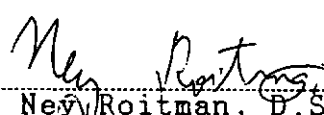


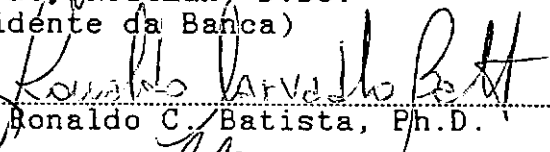
ANÁLISE DA RESPOSTA DINÂMICA
DE UM MODELO EM ESCALA REDUZIDA
DE PLATAFORMA OFFSHORE DO TIPO T.L.P.

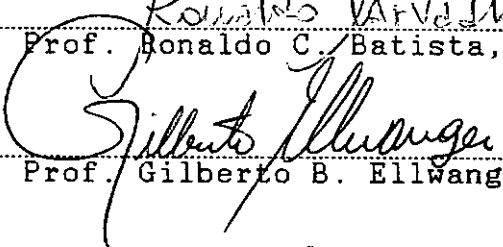
RICARDO FRANKLIN MENDES DE ANDRADE

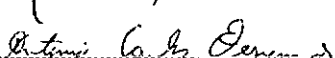
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por :


Prof. Ney Roitman, D.Sc.
(Presidente da Banca)


Prof. Ronaldo C. Batista, Ph.D.


Prof. Gilberto B. Ellwanger, D.Sc.


Antonio Carlos Fernandes, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 1989

ANDRADE, RICARDO FRANKLIN MENDES DE

Análise da Resposta Dinâmica de um Modelo em Escala Reduzida de Plataforma Offshore do Tipo T.L.P. [Rio de Janeiro] 1989

x, 160 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1989

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Modelos reduzidos 2. Análise experimental dinâmica
3. Estruturas offshore 4. T.L.P.

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série).

DEDICATÓRIA

Aos meus Pais, aos meus Irmãos,
e a toda minha Família, pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao Ney, pela orientação e pela amizade e incentivo demonstrados durante a elaboração deste trabalho.

Ao Ronaldo, pela contribuição e pela atenção dispensada durante a elaboração da pesquisa.

A todos os professores, pesquisadores, alunos e técnicos do Laboratório de Estruturas - Magluta, Eliane, Fernando, Flávio, Vicente, Seu João, Oswaldo, José Maria, José Carlos e Santiago - , em especial àqueles que demonstraram interesse e colaboraram de alguma maneira para a realização deste trabalho.

Ao Gilberto Ellwanger, pela sua valiosa contribuição.

Às pessoas - Sagrilo, Humberto, Mário, Marcos, João Paulo e Luiz Fernando - que, antes e durante a realização deste trabalho, incentivaram e contribuíram para a sua elaboração, e se mostraram verdadeiros amigos.

Resumo da tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

**ANÁLISE DA RESPOSTA DINÂMICA
DE UM MODELO EM ESCALA REDUZIDA
DE PLATAFORMA OFFSHORE DO TIPO T.L.P.**

Ricardo Franklin Mendes de Andrade

Dezembro de 1989

Orientador: Ney Roitman

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho relata os resultados de testes experimentais realizados em um modelo reduzido de plataforma do tipo T.L.P. para águas profundas. São feitas comparações entre os sinais dinâmicos obtidos nos testes experimentais e as respostas teórico-numéricas obtidas com um modelo simplificado de 6 graus de liberdade.

Dentre os resultados experimentais, devem ser ressaltados os obtidos para taxa de amortecimento e para os coeficientes de inércia e de arrasto. Foi realizado também um estudo da influência da distribuição da massa do convés para os períodos naturais do modelo. As respostas no tempo dos ensaios sob a ação de impactos e sob a ação de ondas com diferentes ângulos de incidência sobre o modelo também são relatados.

Ensaio experimentais realizados no modelo reduzido permitiram a calibração de modelos numérico-teóricos, assim como a observação de importantes efeitos da interação fluido-estrutura.

Desse modo, deve ser ressaltada a importância da construção de modelos reduzidos para determinação de parâmetros experimentais e para aferição de programas utilizados no projeto e verificação do comportamento de protótipos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

**DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS
OF A T.L.P. SMALL SCALE MODEL**

Ricardo Franklin Mendes de Andrade

December, 1989

Thesis Supervisor: Ney Roitman

Department: Civil Engineering

Experimental tests performed on a hydroelastic reduced scale model of a Tension Leg Platform for deep water are reported. Comparisons between theoretical responses obtained with a simplified 6 D.O.F. are made.

Among the experimental results, those related to damping ratio, inertia and drag coefficients should be highlighted. Tests were performed to verify the contribution of the deck mass distribution for the model natural periods. The experimental time responses from tests under impacts and under wave action with different incident angles are reported.

Experiments performed on the reduced scale model have allowed calibration of numerical models as well as the observation of relevant effects that arise from fluid-structure interaction.

Finally, it is important to emphasize the construction of small scale models for the determination of experimental parameters and for the calibration of numerical models to be used in designing this type of offshore platforms.

ÍNDICE

Capítulo I - INTRODUÇÃO.....	1
I.1 - Considerações Gerais.....	1
I.2 - Histórico.....	2
I.3 - Escopo do Trabalho.....	3
Capítulo II-DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO E DO MODELO REDUZIDO..	5
II.1 - Descrição Sumária do Protótipo.....	5
II.2 - Descrição do Modelo.....	7
II.3 - Confeção do Modelo.....	10
II.3.1 - <i>loadcells</i>	10
II.3.2 - tampas superiores.....	10
II.3.3 - tampas inferiores.....	11
II.3.4 - fundação.....	12
II.3.5 - tendões.....	13
II.3.6 - casco e convés.....	13
II.4 - Montagem do Modelo no Tanque de Ensaios.....	13
Capítulo III - MODELO TEÓRICO-NUMÉRICO UTILIZADO.....	16
III.1 - Descrição Sucinta do Modelo Teórico.....	16
III.2 - Implementações Adicionais.....	18
III.3 - Modelagem física e Numérica do Modelo.....	19
III.3.1 - programa INERCIA.....	19
III.3.2 - programa TLP.....	22
III.4 - Modelagem Física e numérica do Protótipo.....	26
Capítulo IV - RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	27
IV.1 - Instrumentação Utilizada.....	27
IV.2 - Ensaios de Vibrações Livres.....	33
IV.2.1 - determinação das frequências naturais.....	33
IV.2.2 - variação da distribuição da massa do convés..	41
IV.2.3 - resposta no tempo.....	43
IV.2.3.1 - respostas obtidas para impactos em sway...	44
IV.2.3.2 - respostas obtidas para impactos em surge..	48
IV.2.3.3 - respostas obtidas para impactos em heave..	52

IV.2.3.4 - respostas obtidas para impactos em pitch...	55
IV.2.3.5 - respostas obtidas para impactos em roll...	58
IV.2.3.6 - respostas obtidas para impactos em yaw....	61
IV.2.4 - análise da taxa de amortecimento.....	64
IV.3 - Ensaios sob a Ação de Ondas.....	68
IV.3.1 - ondas inclinadas de 0° com a direção surge...	69
IV.3.2 - ondas inclinadas de 30° com a direção surge...	79
IV.3.3 - ondas inclinadas de 60° com a direção surge...	90
IV.3.4 - ondas inclinadas de 90° com a direção surge...	101
Capítulo V - RESULTADOS NUMÉRICOS.....	112
V.1 - Introdução.....	112
V.2 - Simulação de Vibrações Livres.....	112
V.2.1 - obtenção dos períodos naturais.....	112
V.2.2 - resposta no tempo.....	114
V.3 - Simulação da Ação de Ondas.....	123
Capítulo VI - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	129
VI.1 - Análise dos Períodos Naturais.....	129
VI.2 - Análise da Resposta no Tempo.....	130
VI.2.1 - modelo sob a ação de impactos.....	130
VI.2.2 - modelo sob a ação de ondas.....	139
Capítulo VII - CONCLUSÕES.....	154

NOMENCLATURA

A - área transversal do loadcell

ACX - acelerômetro da direção sway

ACY1 - acelerômetro da direção surge, próximo ao CG

ACY2 - acelerômetro da direção surge, afastado do CG

ACZ1 - acelerômetro da direção heave, próximo ao CG

ACZ2 - acelerômetro da direção heave, afastado do CG

ACZ3 - acelerômetro da direção heave, afastado do CG

b - largura do loadcell

B - matriz que relaciona a velocidade angular e as derivações dos ângulos de Euler

e - espessura do loadcell

$E_{Aço}$ - módulo de elasticidade do aço

F - forças

HEAVE - movimento de translação na direção do eixo z

I - momento de inércia

k_A - escala da área

$k_{\frac{E.A}{L}}$ - escala da rigidez axial

k_f - escala da frequência

k_F - escala da força

k_L - escala geométrica

k_M - escala da massa

k_P - escala do peso

k_T - escala do tempo

k_{ρ_w} - escala do peso específico da água

m - massa

M - momento

P - força atuando no loadcell

PITCH - movimento de rotação em torno do eixo x

R - raio médio do loadcell

ROLL - movimento de rotação em torno do eixo y

SURGE - movimento de translação na direção do eixo y

SWAY - movimento de translação na direção do eixo x

v - velocidade de translação

u - deslocamento

w - velocidade angular

YAW - movimento de rotação em torno do eixo z

θ - ângulo de incidência das ondas

σ - tensão no loadcell

$\sigma_{Aço}$ - tensão de escoamento do aço

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 - Considerações Gerais

Diante da ocorrência de jazidas petrolíferas em águas profundas na costa brasileira, surge a necessidade de se desenvolver novas técnicas e novas estruturas para a extração de petróleo. Dentre essas novas estruturas, projetadas visando uma maior economia e segurança, temos as chamadas T.L.P. (*Tension Leg Platform*), que consistem em estruturas flutuantes presas às fundações por cabos atirantados.

O comportamento dinâmico de uma T.L.P., entretanto, não é muito conhecido, necessitando de investigações e pesquisas para o uso destas estruturas se tornar viável para as águas profundas brasileiras. A dificuldade encontrada por não existirem plataformas deste tipo para águas profundas pode ser contornada com a utilização de um modelo reduzido hidrodinâmico projetado de acordo com a teoria da semelhança. Através de ensaios experimentais realizados com o modelo reduzido, é possível a determinação de parâmetros, de cunho essencialmente experimentais, que são necessários para a obtenção de um bom ajuste do modelo teórico-numérico com resultados experimentais. Desta forma a construção de um modelo reduzido permite um melhor entendimento do comportamento dinâmico da TLP em distintas situações, como por exemplo sob a ação de ondas.

O objetivo deste trabalho se resume então na construção e no ensaio de um modelo reduzido hidroelástico de uma T.L.P., projetada para águas profundas, para que se possa ajustar o modelo teórico-numérico, permitindo uma verificação cuidadosa do comportamento global de uma T.L.P..

I.2 - Histórico

Esta pesquisa tem como objetivo a verificação do comportamento global de uma T.L.P. quando submetida às mais diversas condições de mar da costa brasileira. Para a sua realização, partiu-se de pesquisas anteriores [1], tendo sido realizados melhoramentos, o que permitiu uma melhor verificação da resposta da plataforma. Foram realizados diversos tipos de ensaios para verificar o comportamento do modelo sob a ação de impactos, sob a ação de ondas com diferentes ângulos de incidência e com diferentes distribuições da massa do convés.

O desenvolvimento teórico desta pesquisa foi baseado em estudos realizados pela COPPE [2], em publicações sobre projetos de T.L.P. [6], e em publicações sobre modelagem experimental de T.L.P. [8], [9]. Também foram de muita utilidade teses desenvolvidas na COPPE [4], [10], que fundamentaram teorias necessárias ao andamento da pesquisa, como por exemplo a teoria da semelhança, utilizada na construção do modelo, e a teoria baseada na qual foi desenvolvido o programa utilizado para simular o comportamento da T.L.P..

I.3 - Escopo do Trabalho

O presente trabalho apresenta os resultados do comportamento em ensaios experimentais e em simulações numéricas de um modelo reduzido hidroelástico de uma plataforma de petróleo do tipo T.L.P.. Foram realizados ensaios do modelo submetido a impactos e a ondas, e posteriormente estes resultados serviram para ajustar o modelo numérico desenvolvido pela COPPE [10].

No capítulo II encontram-se descritos o protótipo e o modelo construído, as modificações realizadas no modelo para otimizar os resultados dos ensaios, e a montagem do modelo no tanque de ensaios.

No capítulo III são descritos o modelo teórico utilizado para a simulação numérica, as implementações adicionais que se fizeram necessárias, e a modelagem física e numérica do modelo e do protótipo.

No capítulo IV são apresentados os resultados dos ensaios experimentais realizados. É mostrada a instrumentação do modelo, os resultados obtidos para os períodos naturais para as diferentes distribuições da massa do convés, a resposta no tempo do modelo submetido a impactos e sob a ação de ondas com diferentes incidências, além de uma análise da taxa de amortecimento do modelo.

No capítulo V são apresentados os resultados teórico-numéricos dos períodos naturais e a resposta no tempo para a simulação numérica do modelo sob a ação de impactos e de ondas com diferentes incidências.

O capítulo VI apresenta uma análise comparativa dos resultados experimentais e numéricos, para os períodos naturais e as respostas no tempo dos ensaios sob a ação de impactos e sob a ação de ondas. É feita também uma análise preliminar da fadiga nos tendões.

As conclusões sobre a presente pesquisa são apresentadas no capítulo VII, onde são comentados aspectos relevantes da utilização de modelos reduzidos para a verificação do comportamento real de estruturas.

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO E DO MODELO REDUZIDO

II.1 - Descrição Sumária do Protótipo

O protótipo utilizado na análise foi o mesmo definido por FREIRE [1], cujas características principais são descritas na tabela II.1, baseado em estudo realizado pela COPPE [2], já que não existe projeto de uma TLP para a costa brasileira (figura II.1):

Tabela II.1 - Principais Características do Protótipo.

Características do Protótipo	Dimensões
comprimento total do casco	83.20 m
largura total do casco	70.60 m
altura total (casco + convés)	51.00 m
largura dos flutuadores	9.15 m
altura dos flutuadores	10.70 m
diâmetro externo das colunas	14.60 m
altura das colunas	44.00 m
altura do convés	7.00 m
peso do casco	156.86 MN
peso do convés	133.04 MN
força devido ao riser	32.35 MN
altura submersa do casco	29.30 m
seção transversal dos tendões	0.24 m ²

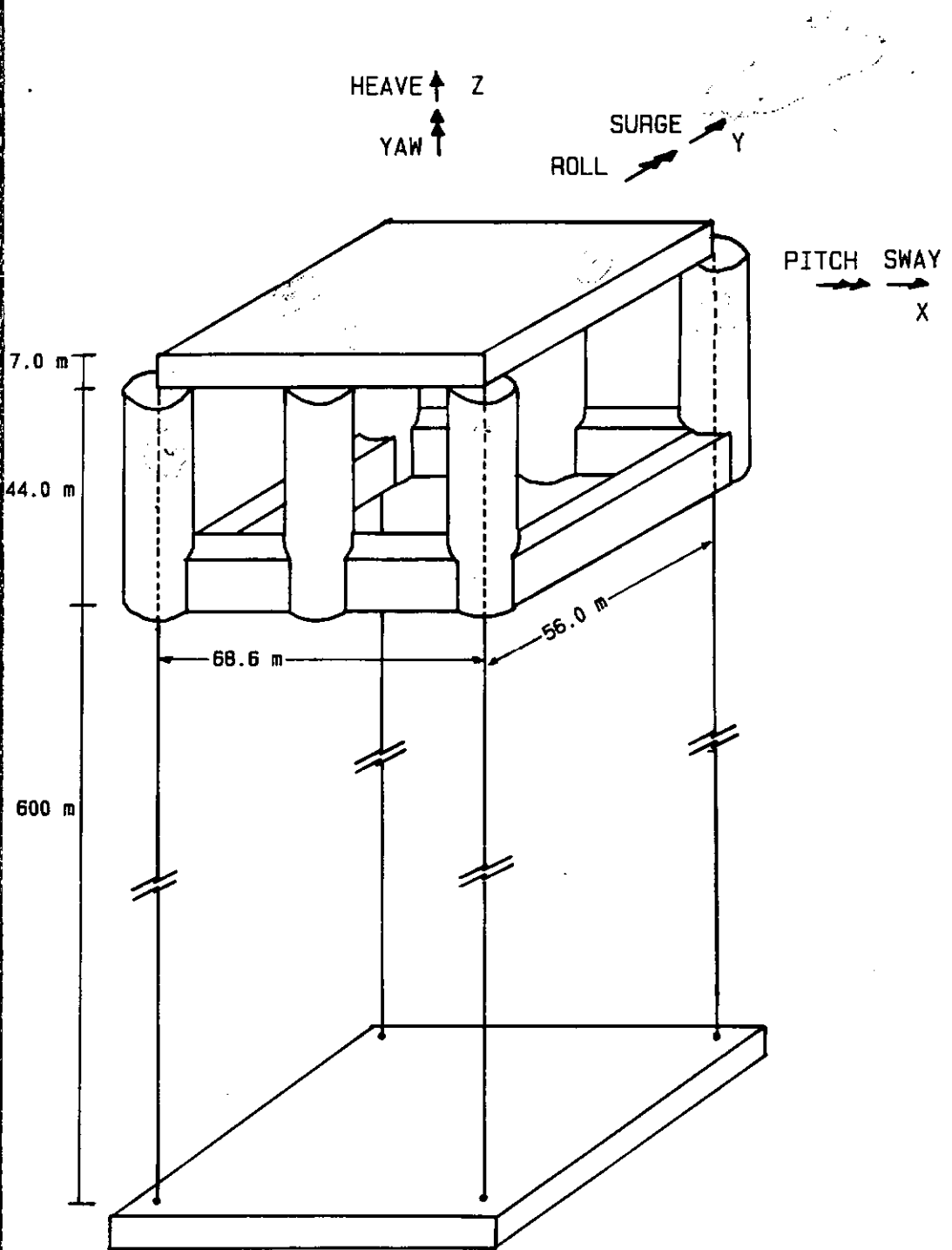


FIGURA II.1 - Dimensões do casco e do convés do protótipo.

Para o cálculo destas características foram utilizadas hipóteses facilmente comprovadas por FREIRE [1], das quais as principais são citadas a seguir:

- a plataforma em questão foi desenvolvida para as condições de mar brasileiras. Para isso foi adotada uma lâmina de água de aproximadamente 600 metros, com ondas de altura igual a 14 metros e com uma maré máxima de 2 metros;
- a dimensão do convés foi definida em função da produção de óleo requerida (100000 barris/dia);
- o peso total do convés e a força do riser foram considerados distribuídos ao longo do convés, facilitando assim a discretização numérica;
- os tendões são considerados rotulados no bloco de fundação para não haver introdução de flexão nas suas extremidades ;
- não é considerada a interação solo-bloco de fundação;

II.2 - Descrição do Modelo

O modelo utilizado nos ensaios foi calculado com base na Teoria da Semelhança [3],[4], conservando sempre as principais características hidrodinâmicas e hidroelásticas do protótipo. As principais escalas utilizadas para a construção do modelo foram:

$$k_L = \frac{\ell_{\text{MODELO}}}{\ell_{\text{PROTÓTIPO}}} = \frac{1}{169} \Rightarrow \text{escala geométrica} \quad [\text{II.1}]$$

$$k_A = k_L^2 \Rightarrow \text{escala da área} \quad [\text{II.2}]$$

$$k_T = \sqrt{k_L} \quad \Rightarrow \text{escala do tempo} \quad [\text{II.3}]$$

$$k_f = \frac{1}{\sqrt{k_L}} \quad \Rightarrow \text{escala da frequência} \quad [\text{II.4}]$$

$$k_M = k_F = k_P = k_{\rho v} \cdot k_L^3 \quad \Rightarrow \text{escalas de massa, de força e de peso} \quad [\text{II.5}]$$

$$k_{\rho v} = \frac{1}{1.025} \quad \Rightarrow \text{escala do peso específico da água} \quad [\text{II.6}]$$

$$k_{\frac{E \cdot A}{L}} = k_{\rho v} \cdot k_L^2 \quad \Rightarrow \text{escala da rigidez axial} \quad [\text{II.7}]$$

Para a modelagem do casco e do convés são consideradas mais importantes as escalas geométrica e dos pesos, enquanto que para o tendão, que apresenta comportamento elástico, é primordial a consideração de semelhança da rigidez axial ao invés da geométrica.

As principais características do modelo construído são descritas na tabela II.2 (figura II.2):

Tabela II.2 - Principais Características do Modelo.

Características do modelo	Dimensões
comprimento total do casco do modelo	49.24 cm
largura total do casco do modelo	41.78 cm
altura total (casco + convés) do modelo	30.18 cm
largura dos flutuadores	5.41 cm
altura dos flutuadores	6.33 cm
diâmetro externo das colunas	8.64 cm
altura das colunas	26.04 cm
altura do convés	4.14 cm
peso do casco + convés + força do riser	5.44 N
altura submersa do casco	17.33 cm
seção transversal dos tendões	0.03393 cm ²

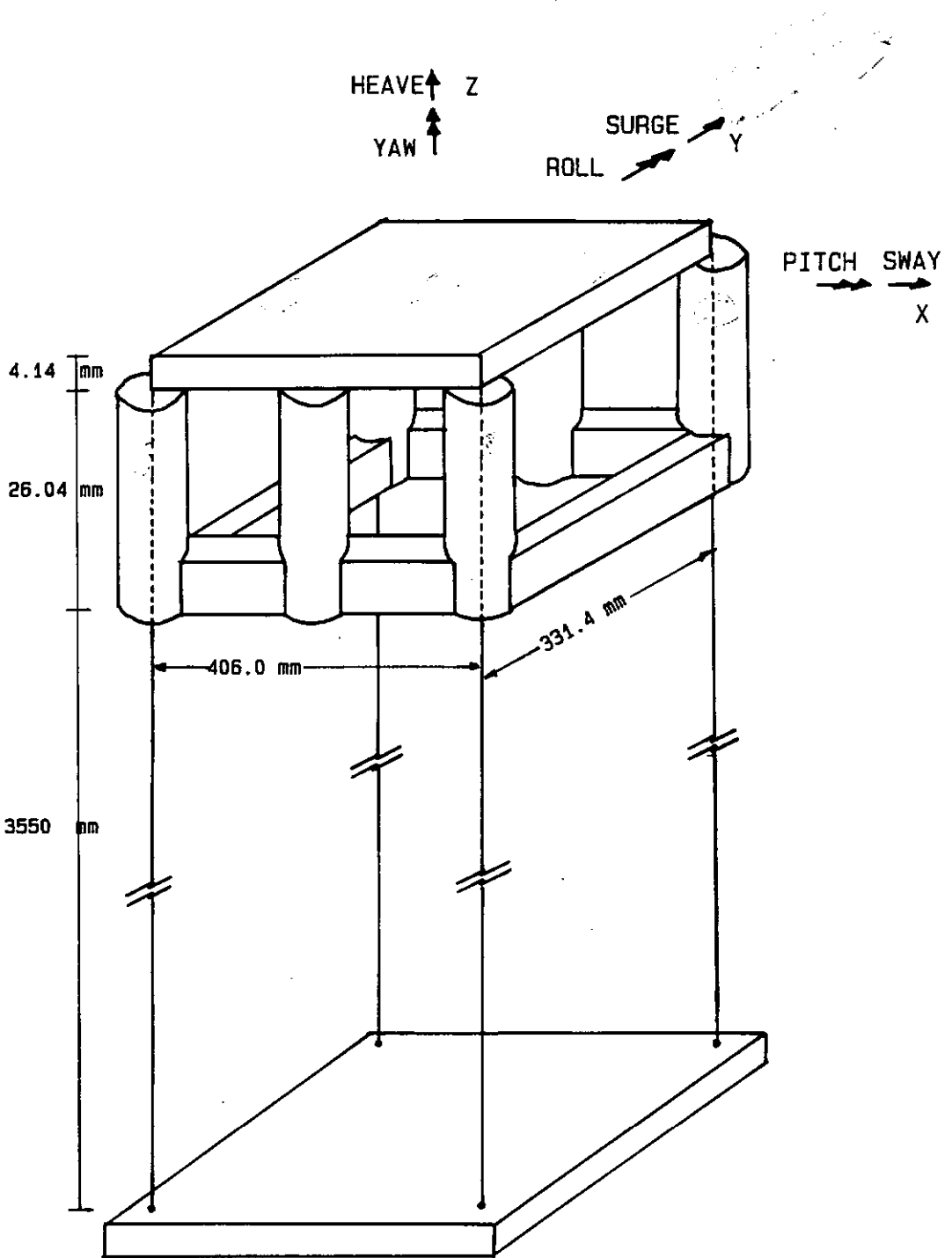


FIGURA II.2 - Dimensões do casco e do convés do modelo.

II.3 - Confeção do Modelo

Para um aproveitamento do modelo construído por FREIRE [1], foram necessárias algumas mudanças para que este apresentasse um melhor desempenho. As principais mudanças são enumeradas a seguir:

II.3.1 - *Loadcells*

Com o objetivo de determinar as forças atuantes nos tendões durante os ensaios, foram construídos *loadcells* do tipo anel com *straingages* ligados em ponte completa de Wheatstone. O cálculo das dimensões do *loadcell* está descrito no capítulo IV.

II.3.2 - Tampas Superiores

Foram necessárias algumas modificações para se otimizar o funcionamento das tampas superiores do modelo. Como primeira modificação, foi projetado um novo cursor, de modo a permitir um equilíbrio inicial das tensões nos tendões. Este novo cursor de formato cilíndrico facilitou o movimento em relação ao antigo com o formato de um paralelepípedo. A segunda modificação consistiu na adoção de um parafuso ajustador do comprimento dos tendões com rosca fina, o que deu uma maior precisão na hora dos ajustes iniciais das tensões nos tendões. Como última modificação temos o projeto de um novo conector para ligação dos tendões aos *loadcells*. Estes novos conectores

foram projetados de modo a minimizar as quebras dos tendões que ocorreram nos ensaios realizados por FREIRE [1]. As modificações realizadas nas tampas superiores, que podem ser observadas na figura II.3, se mostraram eficazes durante os ensaios posteriores.

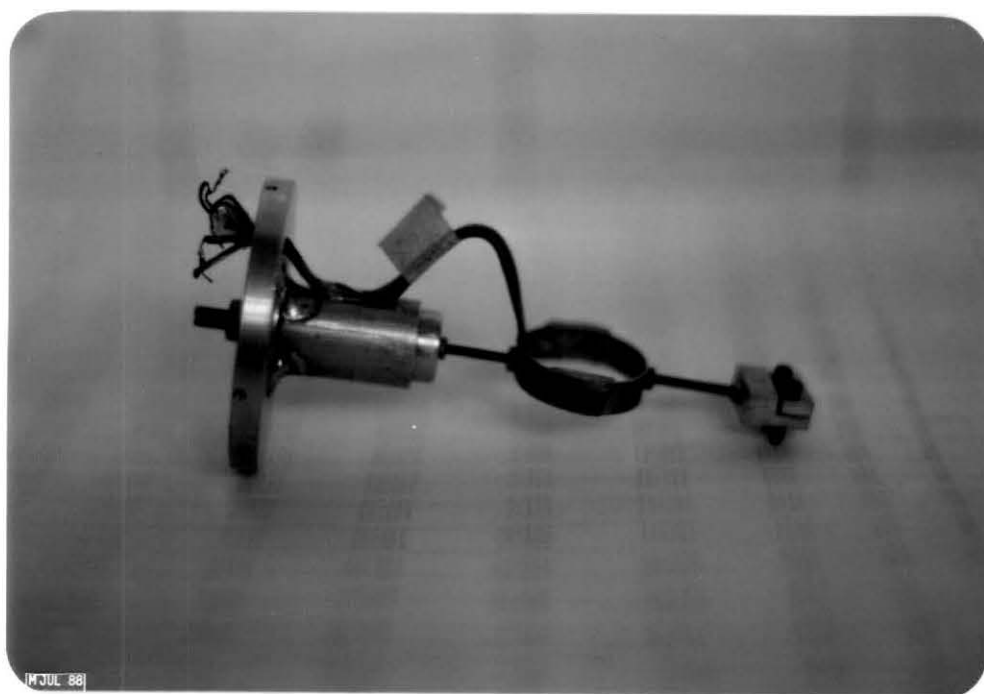


FIGURA II.3 - Modificações das tampas superiores.

II.3.3 - Tampas Inferiores

As tampas inferiores do modelo foram modificadas de modo a termos uma maior impermeabilização, que é necessária não só devido ao peso adicional da água, como também devido aos problemas gerados pela unidade em contato com os *loadcells*. Foi projetada uma tampa em que se prenderia, por intermédio de um sistema de rosca, uma borracha de vedação que não influenciaria no movimento do tendão. Utilizamos como borracha de vedação bicos de

mamadeira infantil com borracha bem flexível, o que provou ser muito satisfatório diante dos resultados das experiências (ver figura II.4). Inicialmente a vedação do contato entre tendão e borracha foi feita colocando graxa na região interior da borracha. Com o início dos ensaios foi observado que esta vedação não era suficiente a longo prazo, o que ocasionou posteriormente a vedação desta região com silicone após a montagem do modelo no tanque de ensaios.



FIGURA II.4 - Modificações das tampas inferiores.

II.3.4 - Fundação

As rótulas das fundações foram mantidas devido ao seu perfeito funcionamento. Foram porém modificados os conectores que ligavam as rótulas aos tendões pelo mesmo

motivo que foram modificados os conectores que ligavam os tendões aos loadcells.

II.3.5 - Tendões

Os tendões foram construídos com o mesmo tubo ABS com diâmetro externo de 2.4 mm e diâmetro interno de 1.2 mm, utilizado por FREIRE [1], cujo módulo de elasticidade médio equivale a 2300 MPa.

II.3.6 - Casco e convés

Com relação ao casco e ao convés não foram realizadas modificações, devendo lembrar somente que nos ensaios foi possível modificar a distribuição da massa do convés para uma posterior análise da sua influência nas frequências naturais. Cabe lembrar também que a estrutura do casco e do convés foi toda impermeabilizada nas suas juntas por uma mistura de resina com talco industrial, o que se mostrou muito satisfatório mesmo após longo tempo de imersão do modelo.

II.4 - Montagem do Modelo no Tanque de Ensaios

Para a montagem do modelo no tanque de ensaios foi adotado procedimento similar ao adotado por FREIRE [1]. As etapas principais são descritas a seguir:

- colocação do bloco de fundação no fundo do tanque com a posterior aparafusagem das rótulas de fundação. Temos que

lembrar que, para o ensaio do modelo sob ação de ondas, foram aplicadas rotações na placa de fundação para simular a incidência de ondas com diferentes ângulos sobre o modelo;

- assentamento do modelo sobre um cavalete de madeira construído de tal forma que a altura submersa do casco ficasse exatamente na altura de projeto;

- fixação dos tendões aos *loadcells*, com as tampas superiores ainda desmontadas, e posterior fechamento das tampas superiores e montagem do convés;

- montagem dos tendões nas rótulas de fundação com auxílio de prumadas para uma maior precisão dos tamanhos de cada tendão;

- calibração das forças iniciais de cada tendão a partir da força teórica para o nível de águas tranquilas através dos parafusos de calibração;

- vedação de todos os pontos críticos de infiltração do modelo com aplicação de silicone, principalmente no contato tendão-borracha flexível e nas tampas superiores;

- fixação do modelo à ponte móvel com o auxílio de arames para posterior desmontagem do cavalete de madeira;

- início do enchimento do tanque.

Após o enchimento do tanque até o nível de águas tranquilas, foi necessário fazer pequenos ajustes nos parafusos ajustadores para equilibrar melhor o modelo, guiando-se sempre pelas marcações da altura submersa ideal existentes no casco.

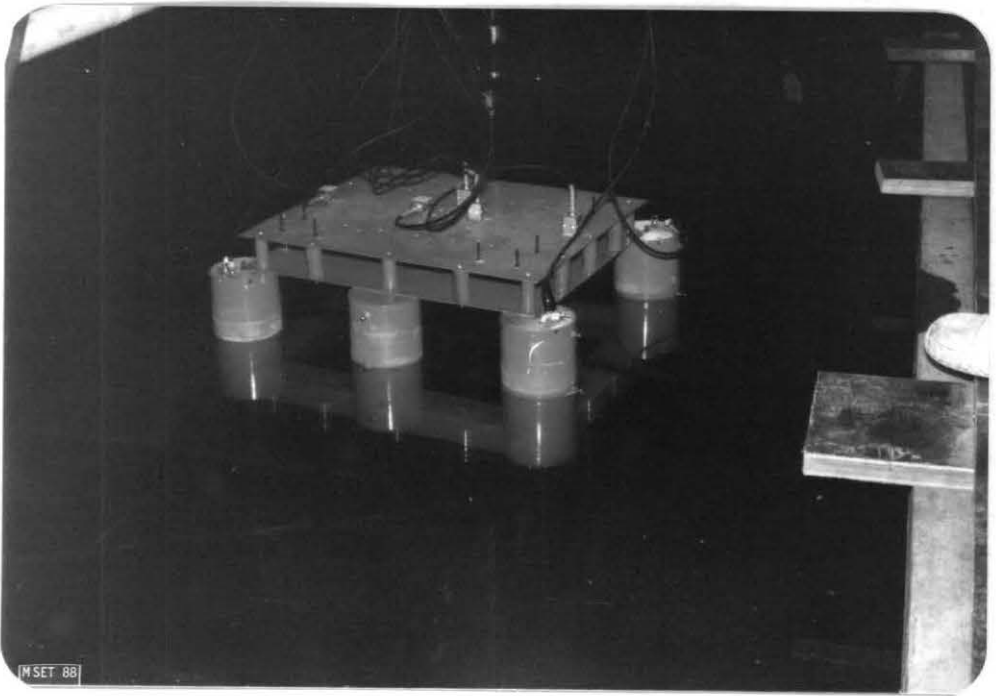


FIGURA II.5 - Detalhe da montagem do modelo no tanque de ondas.

CAPÍTULO III

MODELO TEÓRICO-NUMÉRICO UTILIZADO

III.1 - Descrição Sucinta do Modelo Teórico [2]

No modelo teórico utilizado, o casco é representado por um corpo rígido com seis graus de liberdade e os tendões por um conjunto de molas com comportamento não-linear geométrico. As cargas são determinadas em todos os pontos da estrutura do casco e são transferidas para o seu centro de gravidade. A determinação das cargas é realizada na posição deslocada da estrutura em cada intervalo de integração, sendo considerados os movimentos relativos fluido-estrutura. As equações diferenciais que regem o movimento são descritas a seguir:

$$\left\{ \frac{dv}{dt} \right\} = \left[m \right]^{-1} \cdot \left\{ F \right\} \quad \text{[III.1]}$$

$$\left\{ \frac{du}{dt} \right\} = \left\{ v \right\} \quad \text{[III.2]}$$

$$\left\{ \frac{dw}{dt} \right\} = \left[I \right]^{-1} \cdot \left\{ \left\{ M \right\} - \left\{ W \right\} \cdot \left\{ IW \right\} \right\} \quad \text{[III.3]}$$

$$\left\{ \frac{d\theta}{dt} \right\} = \left[B \right]^{-1} \cdot \left\{ w \right\} \quad \text{[III.4]}$$

Onde:

$$\left\{ v \right\} = \text{vetor de velocidades de translação}$$

$$\left[m \right] = \text{matriz de massa diagonal incluindo massa adicionada}$$

$\{ F \}$ = vetor de forças devido a onda, vento, corrente, empuxo, peso próprio, lastro, amortecimento, restituição dos tendões e restituição dos risers

$\{ u \}$ = vetor de deslocamentos de translação

$\{ w \}$ = vetor de velocidades angulares

$[I]$ = matriz de momentos de inércia

$\{ M \}$ = vetor de momento acarretado pelo vetor $\{ F \}$

$\{ \theta \}$ = vetor dos ângulos de Euler

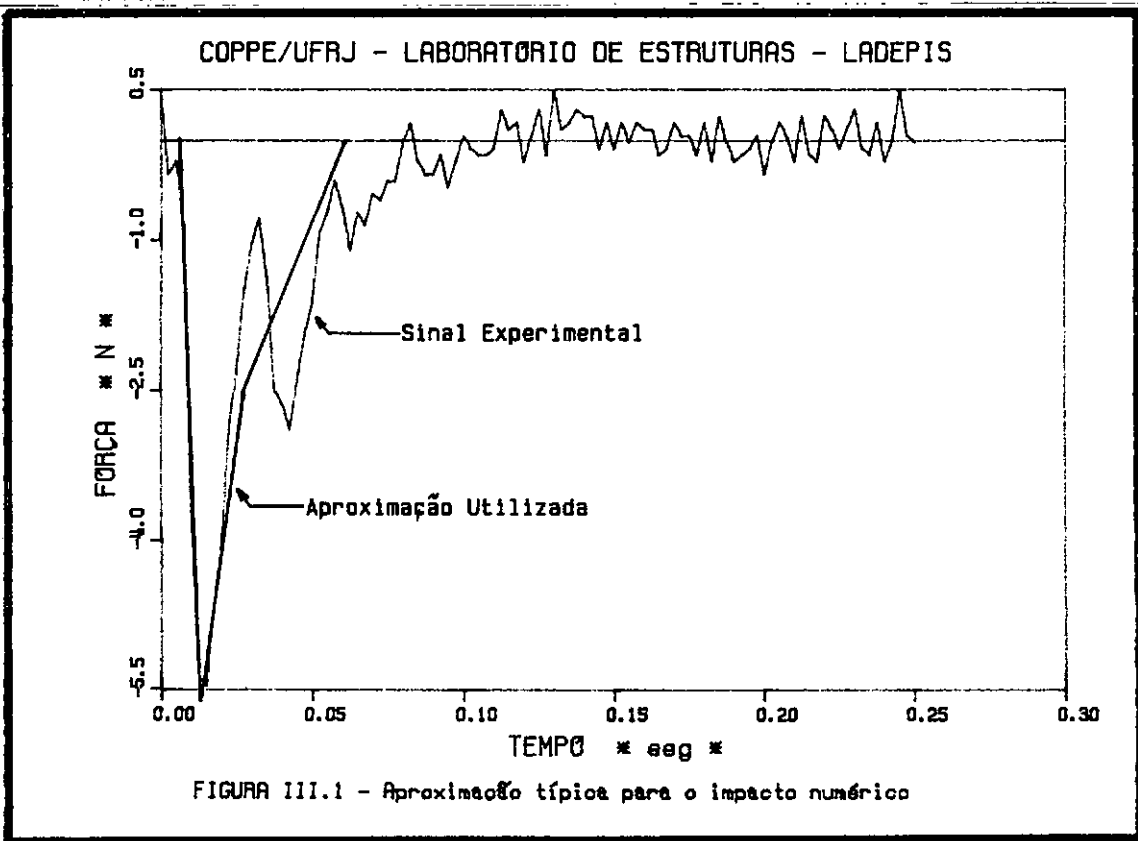
$\{ B \}$ = matriz que relaciona o vetor de velocidades angulares e as derivadas do vetor de ângulos de Euler

As forças e os momentos devidos às ondas são determinados com a fórmula de Morison considerando a velocidade relativa entre a estrutura e as partículas fluidas. As velocidades e as acelerações das ondas são determinadas através da teoria linear de Airy, sendo a velocidade da corrente adicionada vetorialmente.

As forças de restituição dos tendões e dos risers são determinadas individualmente em função das coordenadas atualizadas da extremidade superior de cada tendão. O método de integração adotado foi o de Beta-Newmark.

III.2 - Implementações Adicionais

Foram necessárias algumas implementações adicionais no programa utilizado, para que fosse possível a simulação numérica de alguns tipos de ensaios experimentais. Nesse aspecto foi desenvolvida uma subrotina cujo objetivo é de simular a ocorrência de impactos em determinados pontos da estrutura. Quando da realização dos ensaios, os sinais provenientes dos impactos foram digitalizados e posteriormente implementados como dados de entrada para esta subrotina, que calcula as forças atuantes devido ao impacto sobre a estrutura e dá como resposta o seu movimento no tempo. A figura III.1 apresenta um sinal experimental típico do impacto medido e a aproximação utilizada na simulação numérica.



III.3 - Modelagem Física e Numérica do Modelo

Para a modelagem numérica do modelo foram utilizados dois programas desenvolvidos por ELLWANGER [2]. O primeiro programa, chamado INERCIA, tem como função calcular os momentos de inércia do modelo, que são usados como dados de entrada para o segundo programa. Este segundo programa denominado TLP, calcula os períodos naturais de vibração do modelo e dá como resposta os deslocamentos, as velocidades, as acelerações, as forças nos tendões e as rotações do modelo no tempo. Para uma maior compreensão da modelagem numérica do modelo damos a seguir uma descrição detalhada de todos os seus passos.

III.3.1 - Programa INERCIA

O programa INERCIA considera que o modelo é composto de subestruturas tubulares onde são dadas suas características geométricas e as características mecânicas do material utilizado. Com isso, para este programa ser utilizado para plataformas do tipo TLP, foi necessário discretizar todos os elementos estruturais não tubulares como pesos extras, como por exemplo o peso do convés e dos tendões, conforme abaixo:

- Convés: para a discretização do convés, dividimos este em três partes explicadas a seguir. Como convés superior ficou discretizada a chapa superior onde foram fixados os *load-cells* e como convés inferior ficou discretizada a

chapa inferior que ligava o convés às colunas. Estas duas chapas foram discretizadas segundo a sua área de influência sobre as colunas, conforme mostrado na figura III.2. Como convés médio ficaram discretizados os pontos de locação dos seis pesos de alumínio, que serviram como separação entre os outros dois convés, e dos dez pesos de chumbo, que serviram para simular o peso do convés e a força exercida pelo *riser* extrapolados do protótipo. Esses pesos de chumbo foram discretizados de três maneiras diferentes conforme a figura III.3, com o objetivo de verificar a influência da variação da distribuição da massa do convés nos períodos naturais da estrutura. As discretizações podem ser observadas nas tabelas III.1 e III.2.

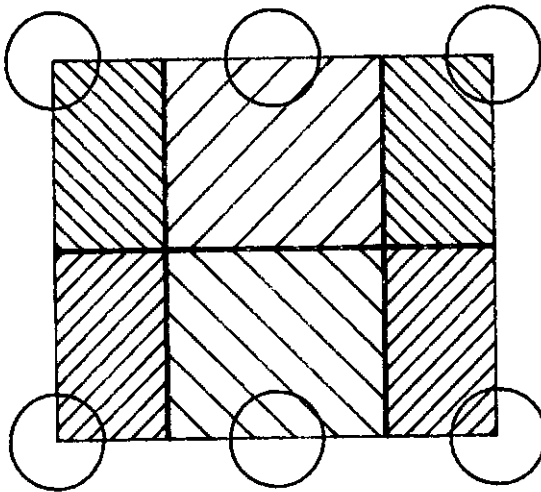


FIGURA III.2 - Área de influência do convés superior e inferior sobre as colunas.

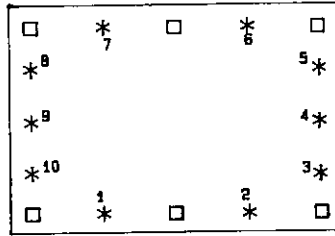


FIG III.3(A) - Distribuição de massa 1

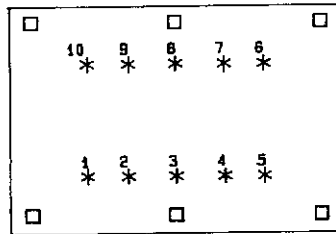


FIG III.3(B) - Distribuição de massa 2

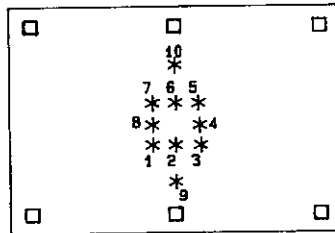


FIG III.3(C) - Distribuição de massa 3

FIGURA III.3 - Discretização das três distribuições da massa do convés medio.

- Colunas e Flutuadores: as colunas foram consideradas como cilindros de alumínio de diâmetro externo idêntico ao projetado e com espessura fictícia de modo a termos o peso real do modelo. Foi necessário também, considerar as tampas superiores e inferiores das colunas como pesos extras, já que o programa não as considerava. Os flutuadores foram considerados como cilindros de alumínio de área equivalente à da seção prismática para simulação

dos mesmos empuxo e massa de água adicionada. A espessura dos flutuadores também foi calculada de modo a se reproduzir o peso real da estrutura. A discretização dos pontos onde estavam locados os pesos devidos às tampas pode ser observada na tabela III.1.

- Tendões: inicialmente, para cálculo das inércias, não foi considerado o peso dos tendões. Posteriormente porém, foi verificado que esta discretização influenciaria razoavelmente no cálculo das inércias. Foram discretizados, então, um tendão por coluna com os pesos variáveis segundo a figura III.4, pois esta discretização foi a que mais correspondeu à realidade por considerar a contribuição diferenciada de cada altura do tendão levando em conta a sua fixação nas colunas e nas fundações.

III.3.2 - Programa TLP

O programa TLP utiliza a mesma discretização descrita para o programa INERCIA para as colunas e flutuadores, porém temos o peso de todo o modelo como dado de entrada, assim como as principais características dos tendões, ou seja, o seu comprimento, sua área transversal e seu módulo de elasticidade, não sendo considerado entretanto seu peso.

As ondas foram representadas através de seu período, sua altura e sua inclinação em relação à direção surge. As ondas implementadas foram as mesmas simuladas nos ensaios, com a diferença que as experimentais eram quase harmônicas, enquanto que as teóricas eram perfeitamente harmônicas.

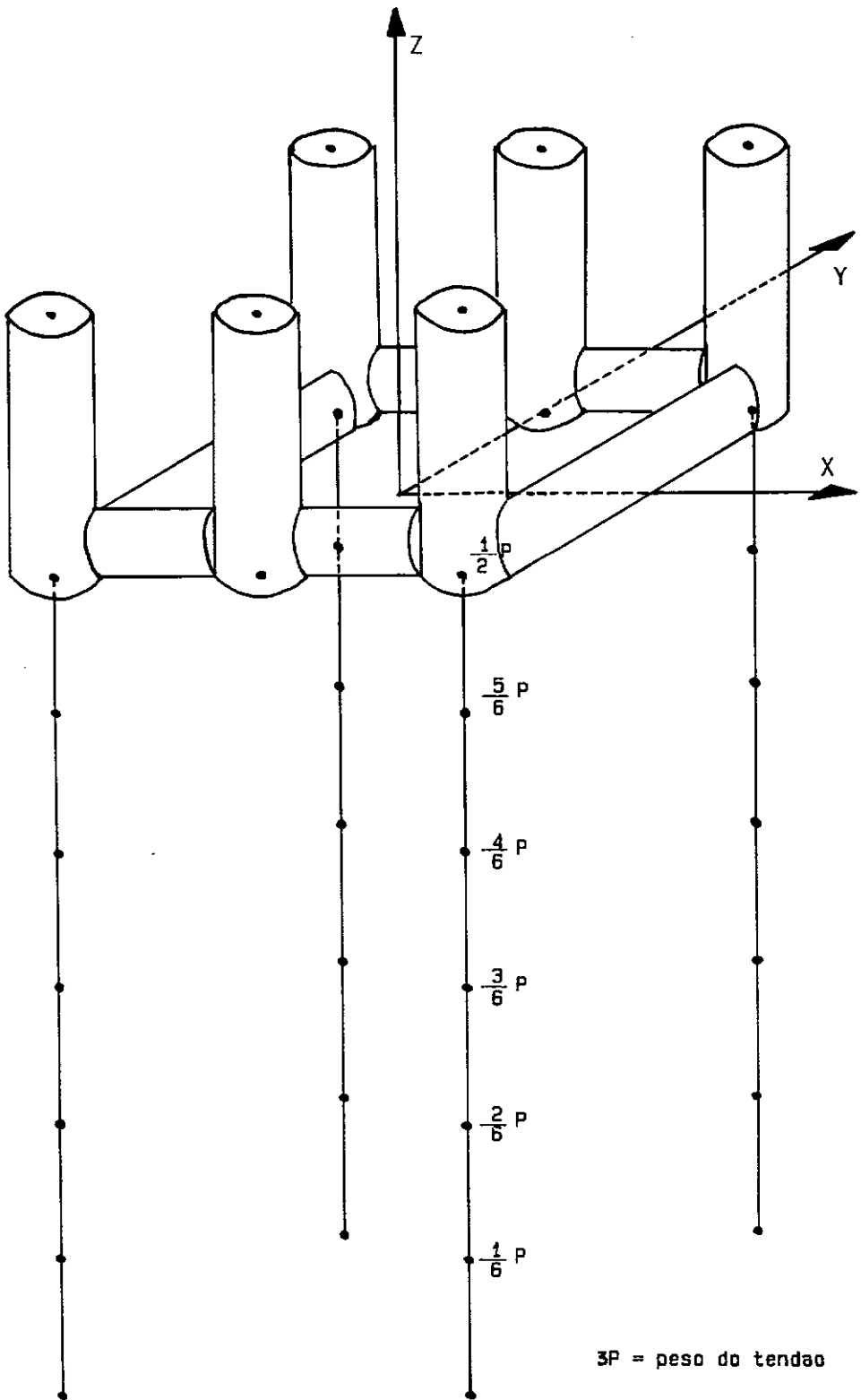


FIGURA III.4 - Discretizacao do modelo mostrando os eixos coordenados.

Tabela III.1 - Discretização dos pesos adicionais para
utilização do programa INERCIA

ESCALARES	PESO	COORDENADAS(CM)		
	N	X	Y	Z
TAMPAS SUPERIORES				
1	1.9000	-20.50	-16.50	26.00
2	0.8088	0.00	-16.50	26.00
3	1.9199	20.50	-16.50	26.00
4	1.9047	-20.50	16.50	26.00
5	0.8088	0.00	16.50	26.00
6	1.9281	20.50	16.50	26.00
TAMPAS INFERIORES				
1	1.1578	-20.50	-16.50	0.00
2	0.8088	0.00	-16.50	0.00
3	1.1422	20.50	-16.50	0.00
4	1.1382	-20.50	16.50	0.00
5	0.8088	0.00	16.50	0.00
6	1.1324	20.50	16.50	0.00
CONVÉS SUPERIOR				
1	0.4289	-18.10	-14.80	30.00
2	0.8578	0.00	-14.80	30.00
3	0.4289	18.10	-14.80	30.00
4	0.4289	-18.10	14.80	30.00
5	0.8578	0.00	14.80	30.00
6	0.4289	18.10	14.80	30.00
CONVÉS INFERIOR				
1	0.4289	-18.10	-14.80	26.00
2	0.8578	0.00	-14.80	26.00
3	0.4289	18.10	-14.80	26.00
4	0.4289	-18.10	14.80	26.00
5	0.8578	0.00	14.80	26.00
6	0.4289	18.10	14.80	26.00
CONVÉS MEDIO				
1	0.2033	-18.10	-14.80	28.00
2	0.2014	0.00	-14.80	28.00
3	0.2026	18.10	-14.80	28.00
4	0.2019	-18.10	14.80	28.00
5	0.2003	0.00	14.80	28.00
6	0.2210	18.10	14.80	28.00

Tabela III.2 - Discretização das três distribuições de massa no convés médio

ESCALARES	PESO	COORDENADAS (CM)		
	N	X	Y	Z
MASSA 01				
1	1.0919	-10.00	-16.00	28.00
2	1.0940	10.00	-16.00	28.00
3	1.1073	19.30	-8.00	28.00
4	1.0874	19.30	0.00	28.00
5	1.0903	19.30	8.00	28.00
6	1.0979	10.00	16.00	28.00
7	1.0846	-10.00	16.00	28.00
8	1.1074	-19.30	8.00	28.00
9	1.0963	-19.30	0.00	28.00
10	1.1047	-19.30	-8.00	28.00
MASSA 02				
1	1.0919	-10.00	-8.00	28.00
2	1.0940	-5.00	-8.00	28.00
3	1.1073	0.00	-8.00	28.00
4	1.0874	5.00	-8.00	28.00
5	1.0903	10.00	-8.00	28.00
6	1.0979	10.00	8.00	28.00
7	1.0846	5.00	8.00	28.00
8	1.1074	0.00	8.00	28.00
9	1.0963	-5.00	8.00	28.00
10	1.1047	-10.00	8.00	28.00
MASSA 03				
1	1.0919	-2.00	-2.00	28.00
2	1.0940	0.00	-2.00	28.00
3	1.1073	2.00	-2.00	28.00
4	1.0874	2.00	0.00	28.00
5	1.0903	2.00	2.00	28.00
6	1.0979	0.00	2.00	28.00
7	1.0846	-2.00	2.00	28.00
8	1.1074	-2.00	0.00	28.00
9	1.0963	0.00	-8.00	28.00
10	1.1047	0.00	8.00	28.00

III.4 - Modelagem Física e Numérica do Protótipo

Para o protótipo foram adotadas as mesmas hipóteses simplificadoras utilizadas na modelagem física do modelo (ver seção III.3).

Para o cálculo das frequências naturais e da resposta do protótipo foram utilizados os programas INERCIA e TLP já descritos sumariamente na seção III.3. A discretização das colunas, dos flutuadores e dos tendões também foi feita de forma análoga à do modelo reduzido.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

IV.1 - Instrumentação Utilizada

O modelo foi instrumentado a fim de serem medidas as acelerações e as rotações devidas aos impactos e às ondas, e para se medir a variação da força em cada tendão nestes mesmos ensaios.

Para se medir as acelerações foram locados sobre o convés principal 6 micro-acelerômetros, de modo que fossem medidas as três acelerações principais nas direções sway, surge e heave, e de modo a serem calculadas as três rotações nas direções pitch, roll e yaw. A locação dos acelerômetros pode ser vista na figura IV.1.

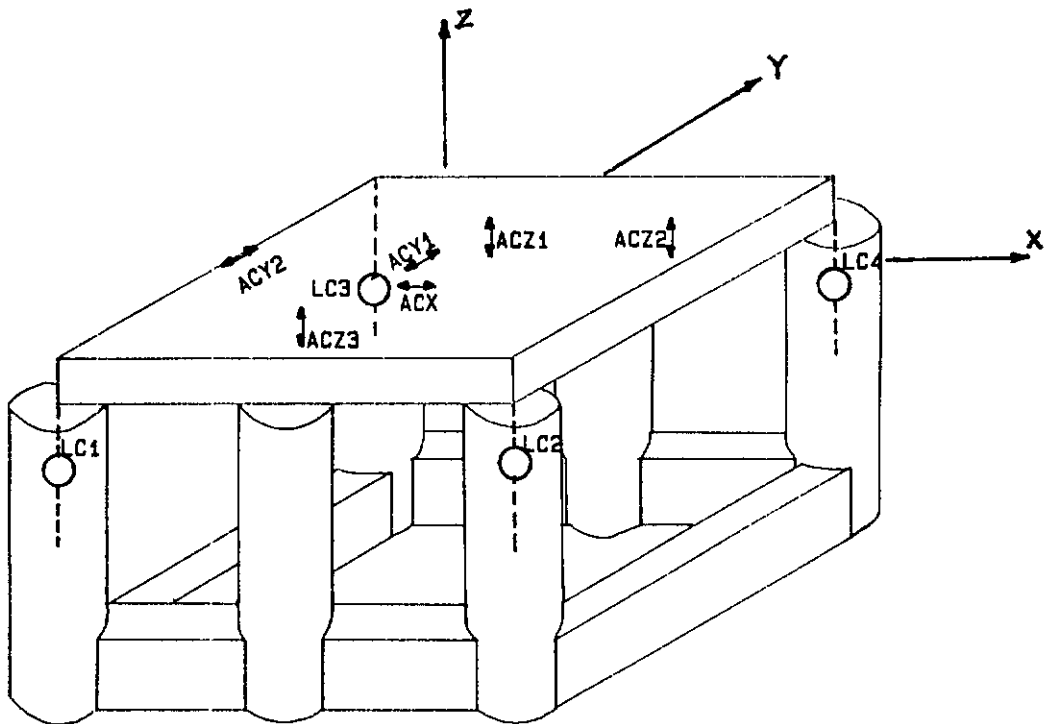


FIGURA IV.1 - Locação dos acelerômetros e dos loadcells no convés superior.

As rotações foram calculadas através das acelerações medidas em dois pontos de uma mesma direção, como por exemplo para termos a rotação na direção roll, utilizamos as acelerações medidas pelos acelerômetros ACZ1 e ACZ2, conforme figura IV.1. Com isso podemos obter a rotação na direção roll através da divisão da diferença dos sinais dos dois acelerômetros integrados duplamente no tempo pela distância entre eles (figura IV.2).

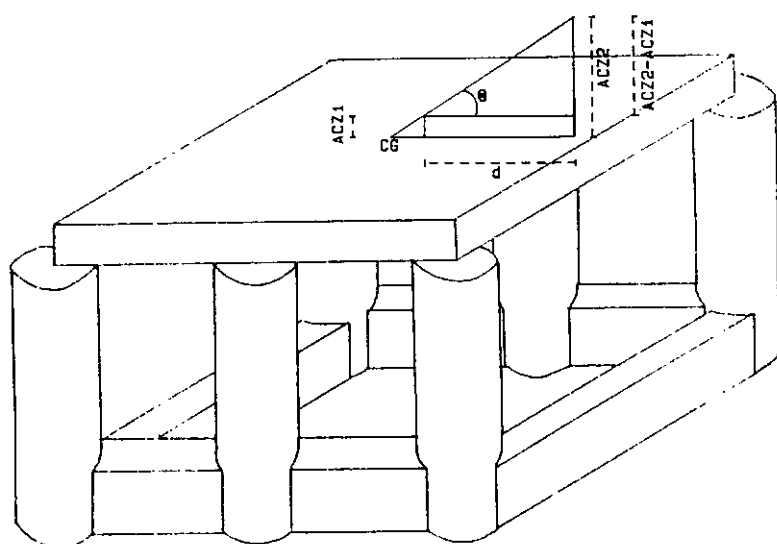


FIGURA IV.2 - Esquema para cálculo da rotação na direção roll.

$$\text{daí temos que } \theta = \arctg \left[\frac{\iint (ACZ2 - ACZ1) dt}{d} \right] \text{ [em graus]}$$

onde ACZ2 é o sinal no tempo do acelerômetro ACZ2,

ACZ1 é o sinal no tempo do acelerômetro ACZ1,

d é a distância entre os dois acelerômetros ACZ2 e ACZ1.

Seguindo o mesmo raciocínio, para a rotação em pitch usamos os sinais obtidos pelos acelerômetros ACZ1 e ACZ3, e para a rotação em yaw usamos os sinais obtidos pelos acelerômetros ACY1 e ACY2.

Com o objetivo de determinar as forças atuantes nos tendões durante os ensaios, foram construídos *loadcells* do tipo anel com *straingages* ligados em ponte completa de Wheatstone. Para o cálculo das dimensões do *loadcell* foi necessária a utilização das equações IV.1-5.

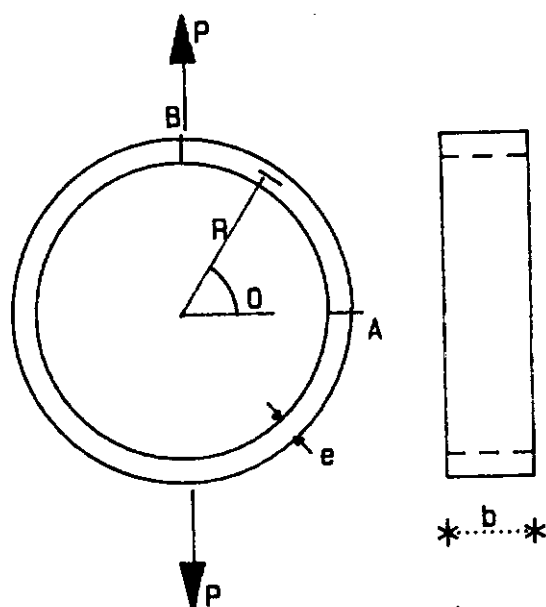


FIGURA IV.3 - Esquema para cálculo das tensões máximas em um *loadcell*.

Temos então para os momentos

$$M_{\theta} = \frac{P \cdot R}{2} \left[\frac{2}{\pi} - \cos \theta \right] \quad [\text{IV.1}]$$

$$M_A = -0.182 P \cdot R \quad [\text{IV.2}]$$

$$M_B = 0.318 P \cdot R \quad [\text{IV.3}]$$

e para as tensões

$$\sigma = \frac{P}{2 \cdot A} + \frac{6 \cdot M}{b \cdot e^2} \quad [\text{IV.4}]$$

$$\sigma_B \cong \frac{6 \cdot M_B}{b \cdot e^2} \quad [\text{IV.5}]$$

onde P = força a ser lida
 R = raio médio do anel
 b = largura do anel
 e = espessura do anel

Assim temos que o tubo escolhido, para uma força máxima de 60 N, e com as seguintes características foi satisfatório:

$R = 18.5 \text{ mm}$
 $b = 1.0 \text{ mm}$
 $e = 10.0 \text{ mm}$
 $E_{\text{aço}} = 210000 \text{ MPa}$
 $\sigma_{\text{aço}} = 240 \text{ MPa}$

Assim, como $\sigma_A = 124.21 \text{ MPa}$ e $\sigma_B = 211.79 \text{ MPa}$ e $\sigma_A < \sigma_B < \sigma_{\text{aço}}$, podemos afirmar que para as tensões a que estará sujeito o *loadcell* não ocorrerá o escoamento deste, tendo portanto um comportamento linear.

Foram construídos então sete *loadcells*, quatro para medir as forças dos tendões, dois para medir as forças dos impactos que excitam a estrutura e mais um de reserva. Cada um destes *loadcells* foi calibrado através da adição gradativa de pesos e da respectiva leitura de sua deformação. Foi então obtido um gráfico onde a ordenada é o peso adicionado a cada etapa de carga e a abcissa é a deformação lida no sensor. Com isso foi obtida uma constante para cada *loadcell*, cujos valores são apresentados abaixo:

$$R_1 = 0.0270 \text{ N}/\mu\text{st}$$

$$R_2 = 0.0302 \text{ N}/\mu\text{st}$$

$$R_3 = 0.0275 \quad N/\mu st$$

$$R_4 = 0.0276 \quad N/\mu st$$

$$R_5 = 0.0288 \quad N/\mu st$$

$$R_6 = 0.0262 \quad N/\mu st$$

$$R_7 = 0.0246 \quad N/\mu st$$

Foram realizados ensaios de vibrações livres do modelo submetido a impactos, com o objetivo de se obter suas principais frequências naturais e de determinar a taxa de amortecimento de cada modo de vibração. Foram também realizados ensaios de vibrações livres do modelo submetido a impactos medidos, para uma posterior comparação da resposta no tempo com resultados numéricos. Como última bateria de ensaios, temos os ensaios realizados sob ação de ondas com diferentes ângulos de incidência sobre o modelo. Os resultados destes ensaios podem ser vistos nos itens a seguir. Deve ser lembrado que os sinais dos sensores de aceleração e de força foram amplificados, filtrados e gravados analogicamente conforme mostrado na figura IV.4 (A).

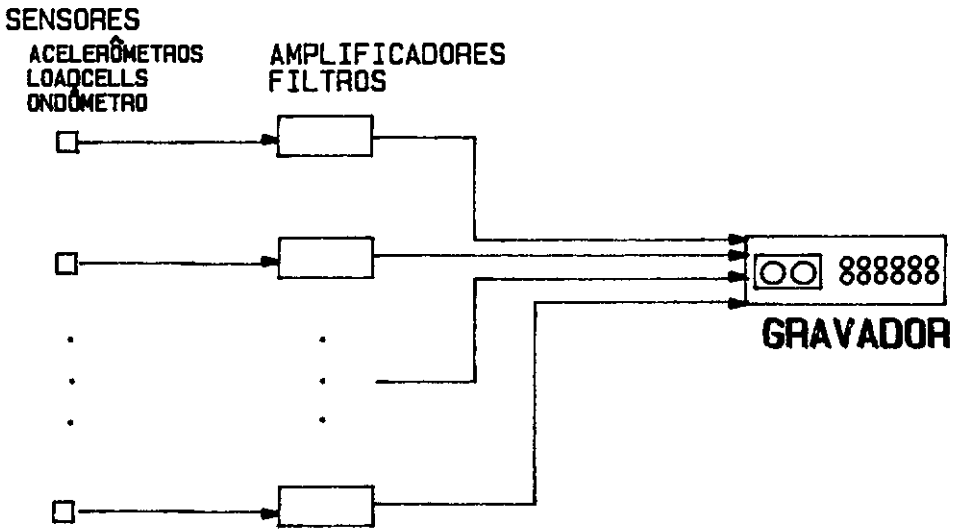


FIG IV.4(A) - Aquisição de dados

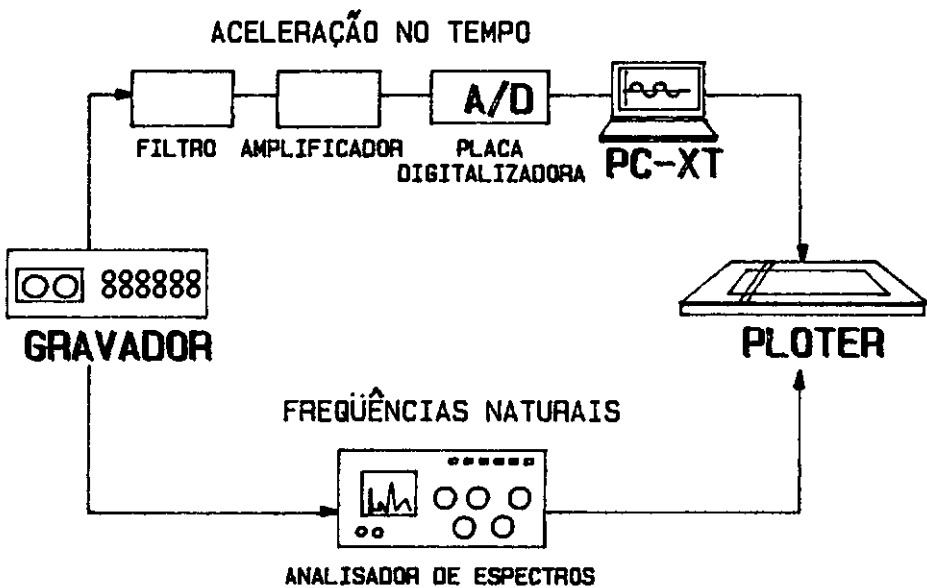


FIG IV.4(B) - Tratamento dos sinais

FIGURA IV.4 - Esquema da aquisição de dados e do tratamento dos sinais.

IV.2 - Ensaios de Vibrações Livres

Os primeiros ensaios realizados sobre o modelo foram os ensaios de vibrações livres com o objetivo de :

- determinar as principais frequências naturais do modelo;
- observar o comportamento do modelo quando submetido a impactos excitando isoladamente cada modo de vibração;
- observar fenômenos resultantes da interação fluido-estrutura, como por exemplo o coeficiente de inércia;
- e para determinar a taxa de amortecimento de cada modo de vibração do modelo.

IV.2.1 - Determinação das Frequências Naturais

Foram realizados ensaios com três distribuições de massa do convés do modelo para verificar a sua influência nas frequências naturais da TLP. A figura IV.5 ilustra as três distribuições utilizadas. Para a determinação das frequências naturais do modelo, para cada caso de distribuição de massa do convés, foram utilizados os sinais obtidos devido à excitação do modelo com impactos dados com as pontas dos dedos. Foram excitados alternadamente cada modo de vibração, e os sinais no tempo foram transformados para o domínio da frequência através de um analisador de espectros modelo HP-3582A, utilizando a técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT). A figura IV.4 mostra esquematicamente os equipamentos

utilizados nesta análise. As figuras IV.6 a IV.11 mostram os espectros da variação de força nos tendões 1,2,3 ou 4 quando o modelo é excitado nos modos sway, surge, heave, pitch, roll e yaw respectivamente, para o caso de distribuição de massa 1. Através da análise desses espectros foram identificadas as frequências naturais do modelo, relacionadas na tabela IV.1. Esta tabela mostra também as frequências naturais associadas aos seis modos principais de vibração, para os casos de distribuição de massa 2 e 3 do convés.

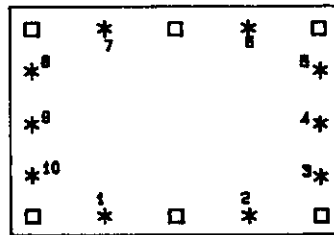


FIG IV.5(A) - Distribuição de massa 1

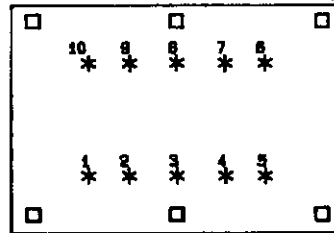


FIG IV.5(B) - Distribuição de massa 2

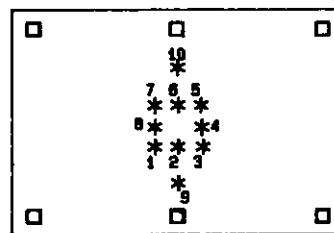


FIG IV.5(C) - Distribuição de massa 3

FIGURA IV.5 - Discretização das três distribuições da massa do convés médio.

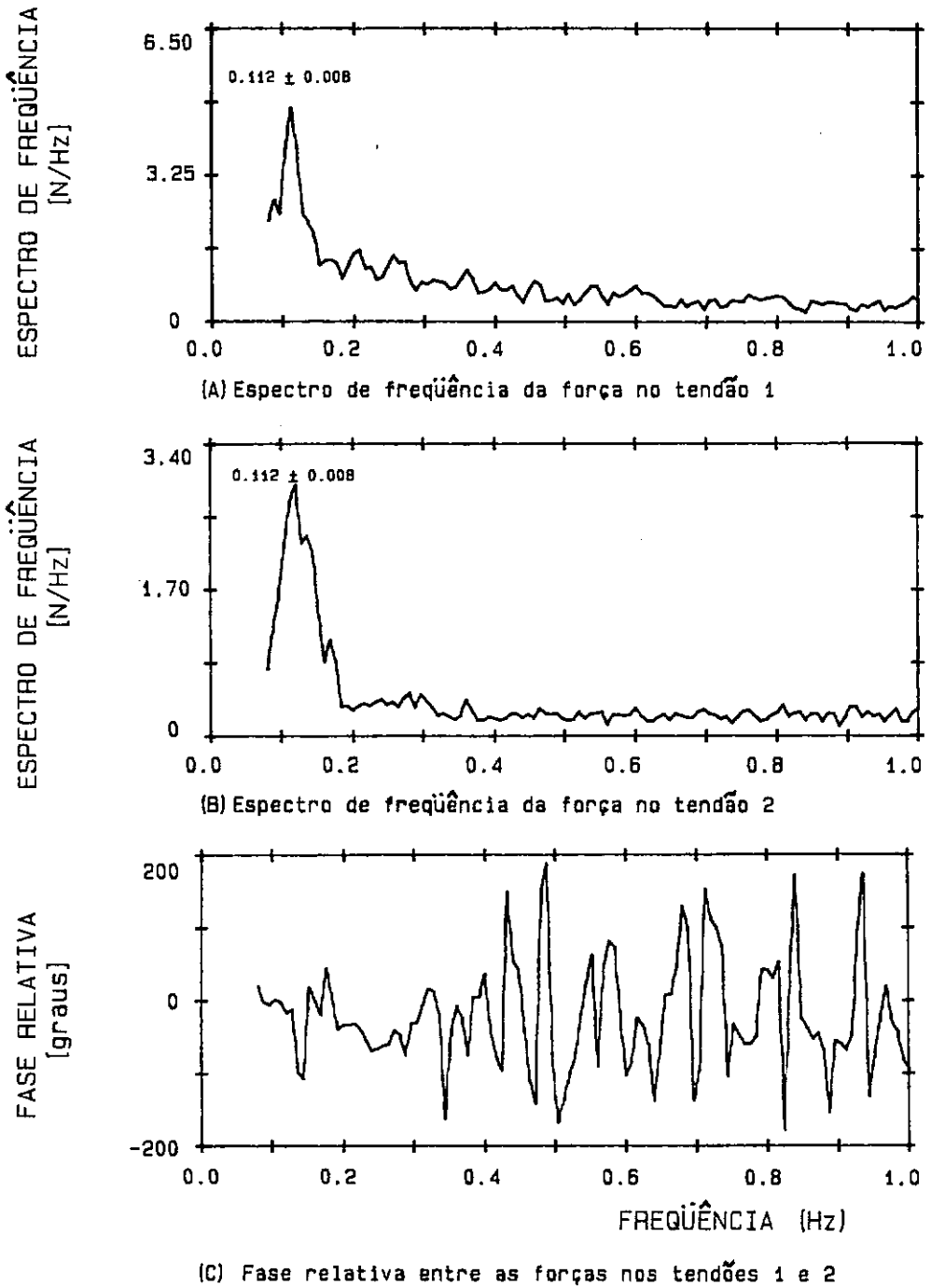


FIGURA IV.6 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido a impactos excitando o modo sway de vibração.

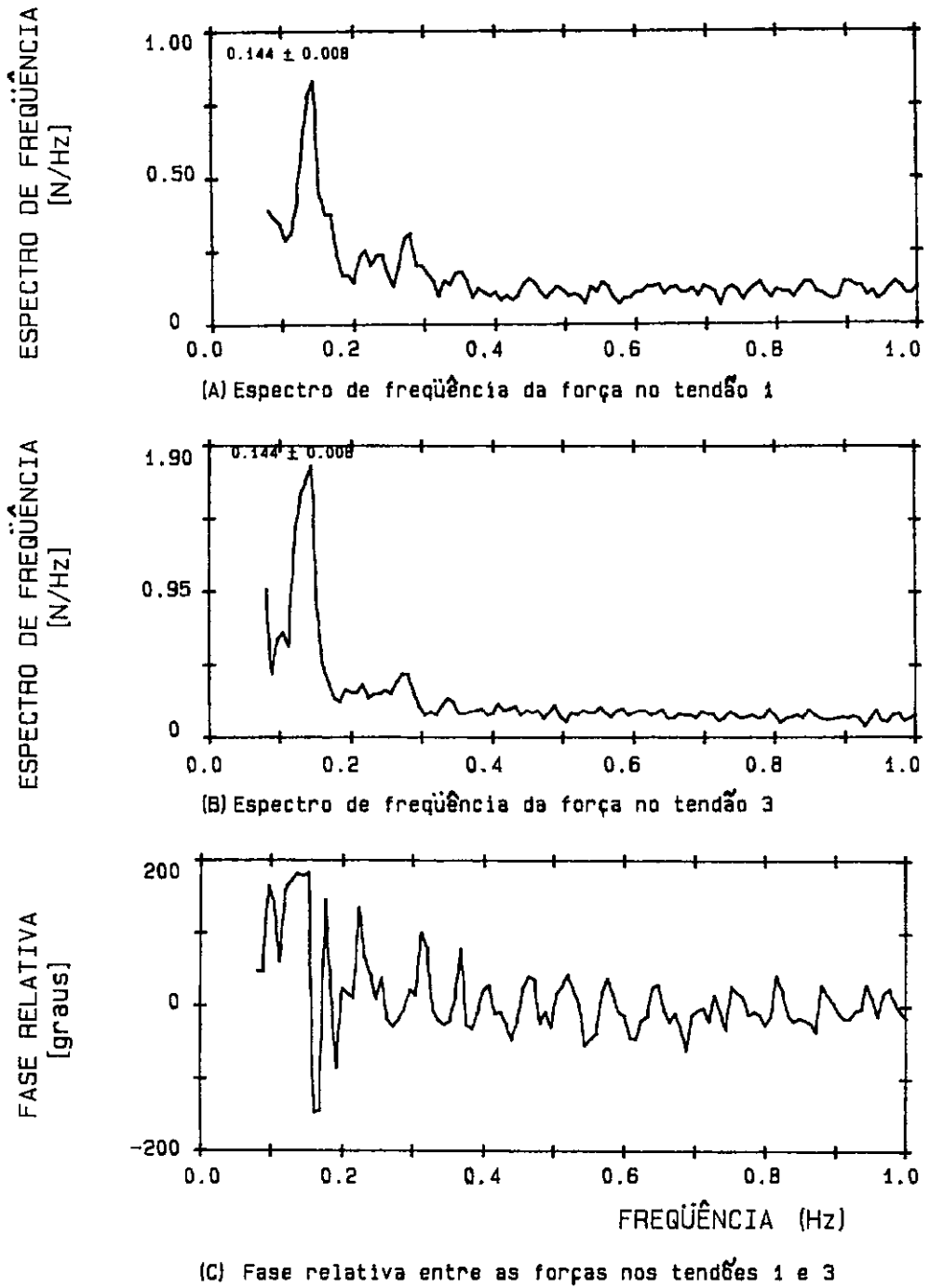


FIGURA IV.7 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido a impactos excitando o modo surge de vibração.

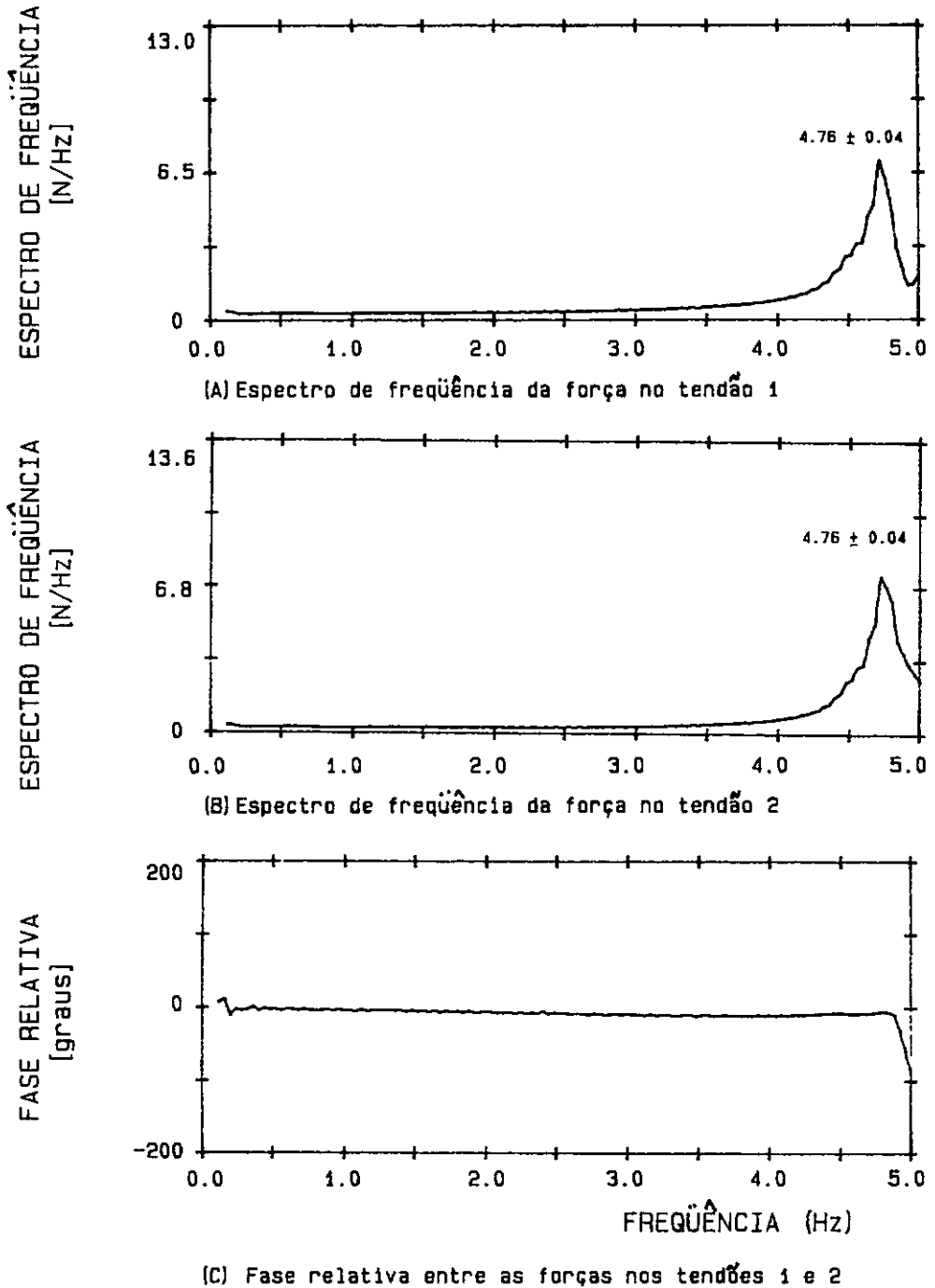


FIGURA IV.8 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido a impactos excitando o modo heave de vibração.

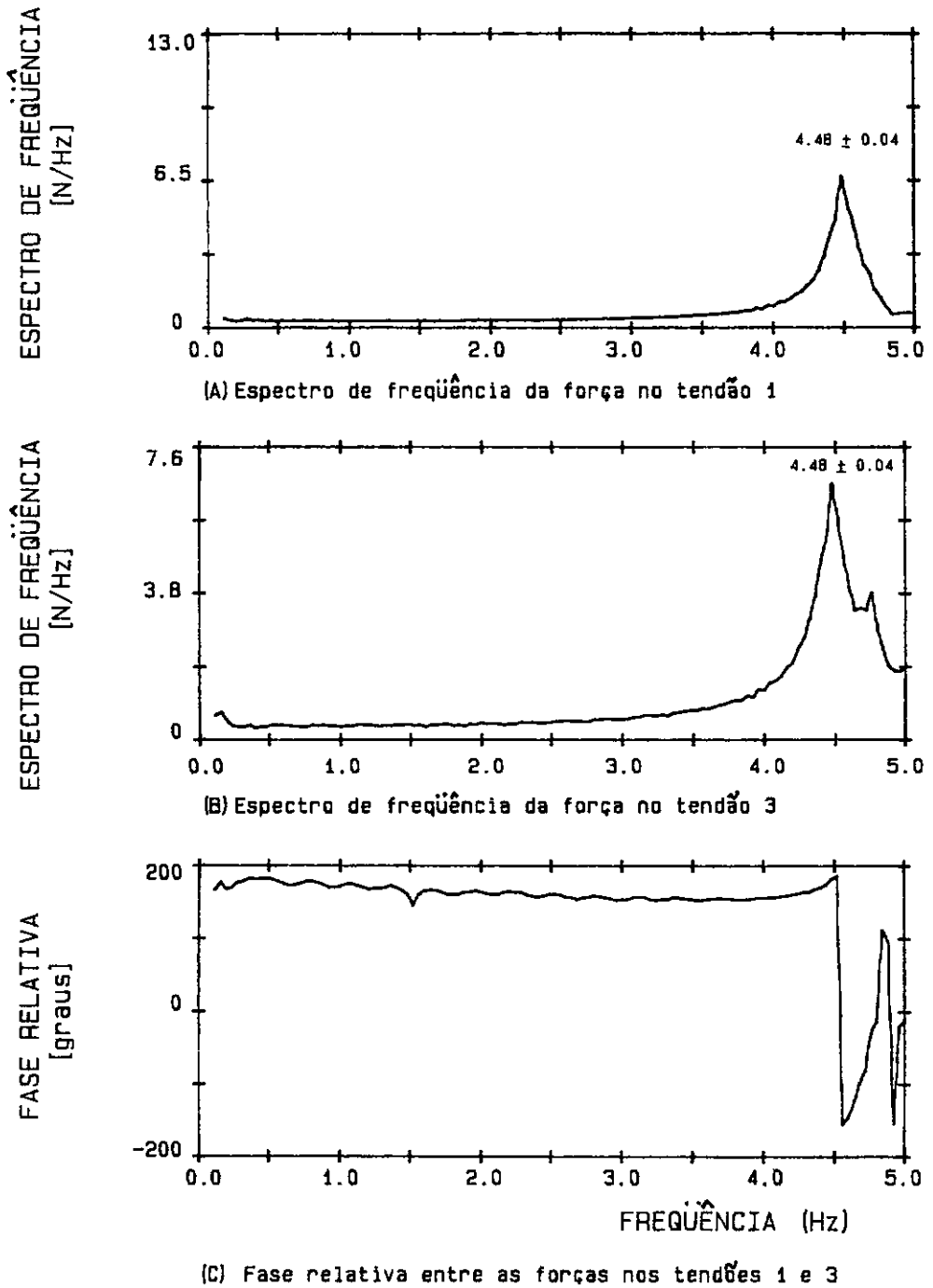


FIGURA IV.9 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido a impactos excitando o modo pitch de vibração.

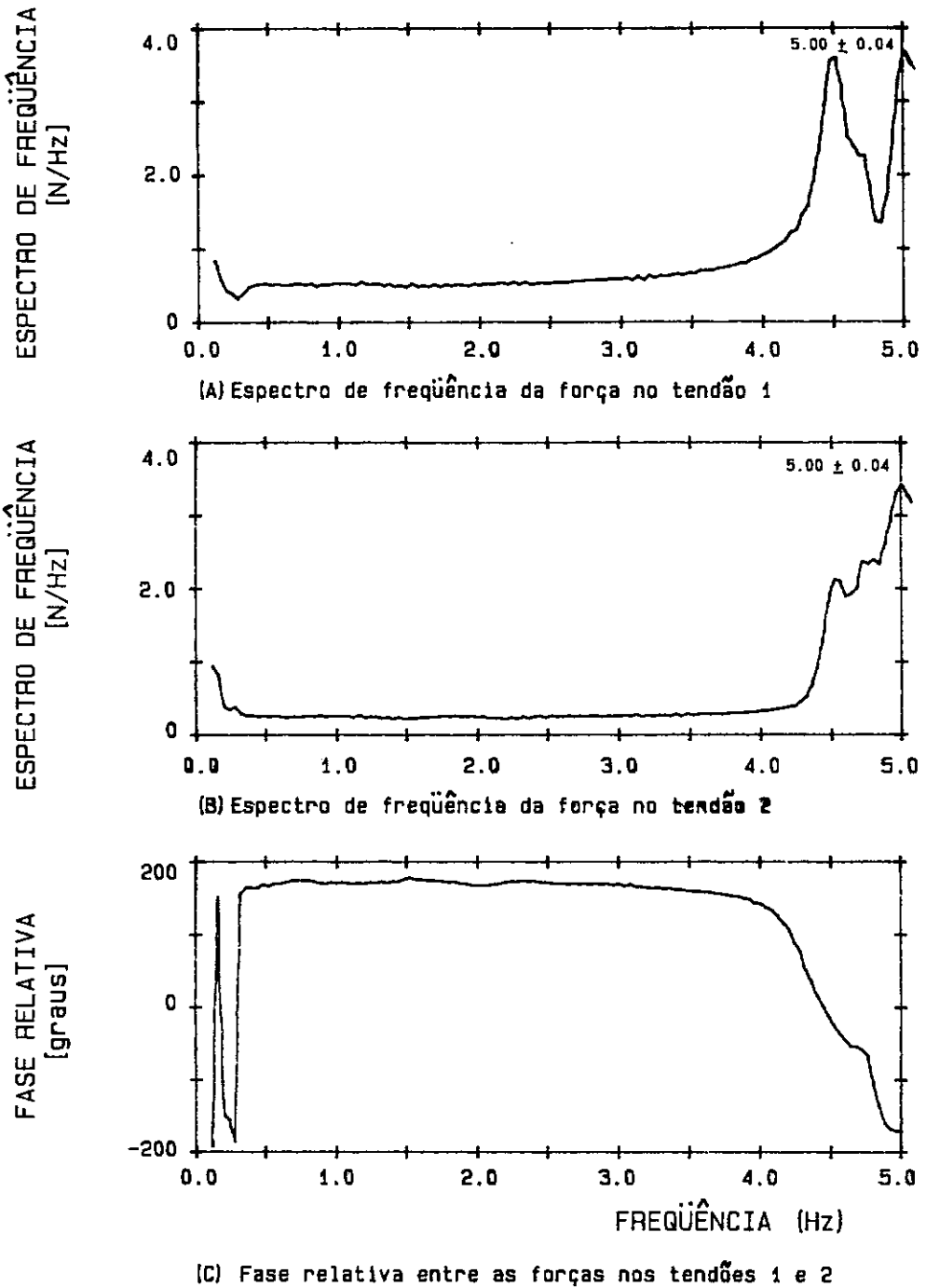


FIGURA IV.10 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido a impactos excitando o modo roll de vibração.

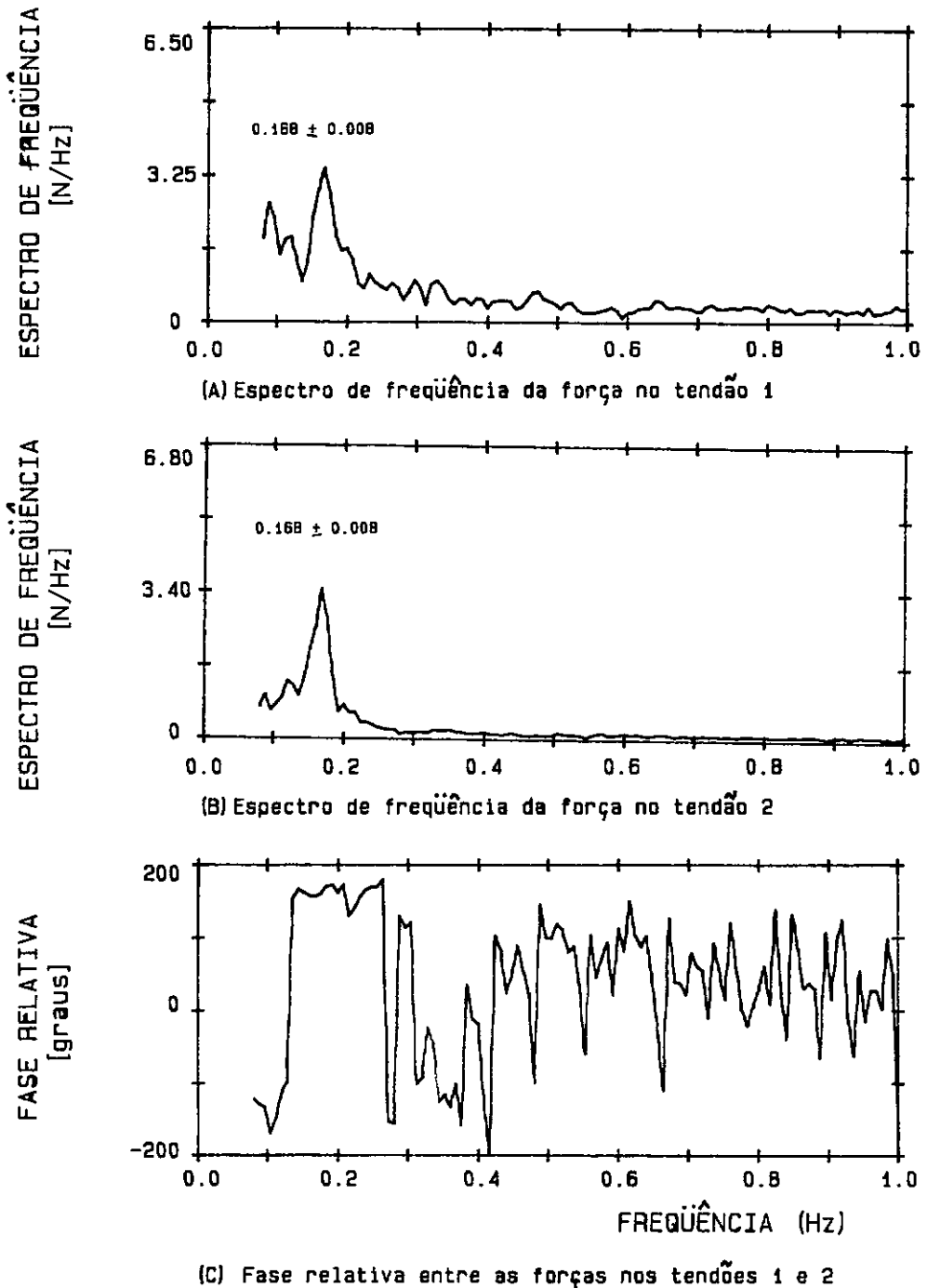


FIGURA IV.11 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido a impactos excitando o modo yaw de vibração.

TABELA IV.1 - Frequências naturais obtidas para os ensaios experimentais, considerando as três distribuições de massa do convés do modelo.

MODOS DE VIBRAÇÃO	FREQUÊNCIAS (Hz)		
	DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 1	DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 2	DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 3
SWAY	0.112 ± 0.008	0.112 ± 0.008	0.112 ± 0.008
SURGE	0.144 ± 0.008	0.144 ± 0.008	0.144 ± 0.008
HEAVE	4.76 ± 0.04	4.72 ± 0.04	4.68 ± 0.04
PITCH	4.48 ± 0.04	4.56 ± 0.04	4.72 ± 0.04
ROLL	5.00 ± 0.04	5.12 ± 0.08	5.20 ± 0.08
YAW	0.168 ± 0.008	0.168 ± 0.008	0.176 ± 0.008

IV.2.2 - Variação da Distribuição da Massa do Convés

É apresentada agora uma análise da influência das três diferentes distribuições de massa nas frequências naturais do modelo. Deve ser lembrado que a massa total do convés permaneceu sempre a mesma, variando somente a sua distribuição ao longo do convés, conforme mostrado na figura IV.5. Na tabela IV.2 podem ser vistos os momentos de inércia para cada uma das distribuições de massa e na tabela IV.3 temos a redução em porcentagem dos momentos de inércia das distribuições de massa 2 e 3 em relação ao momento de inércia da distribuição de massa 1.

Tabela IV.2 - Momentos de inércia para as três distribuições de massa do convés do modelo.

MOMENTO INÉRCIA [Kg. mm ²]	DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 1	DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 2	DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 3
I _{xx}	2.992 x 10 ⁹	2.413 x 10 ⁹	2.359 x 10 ⁹
I _{yy}	3.337 x 10 ⁹	2.588 x 10 ⁹	2.535 x 10 ⁹
I _{zz}	3.390 x 10 ⁹	3.064 x 10 ⁹	2.956 x 10 ⁹

Tabela IV.3 - Porcentagem de variação dos momentos de inércia em relação ao momento de inércia da distribuição de massa 1.

MOMENTO DE INÉRCIA	VARIAÇÃO EM RELAÇÃO AO MOMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 1 (%)	
	DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 2	DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 3
I_{xx}	19.3	21.2
I_{yy}	22.4	24.0
I_{zz}	9.6	12.8

A tabela IV.4 mostra a variação das frequências naturais do modelo devido às distribuições de massa 2 e 3 em relação à distribuição de massa 1, em porcentagem, onde o sinal positivo significa que a frequência aumentou em relação à frequência da distribuição de massa 1, e o sinal negativo significa que a frequência diminuiu.

Analisando os resultados expostos na tabela IV.4, podemos concluir que as frequências naturais não tiveram alteração significativa em função da distribuição de massa do convés para nenhum modo de vibração. A pequena variação existente no modo heave é devida à precisão dos aparelhos utilizados.

Tabela IV.4 - Influência da distribuição da massa do convés nas frequências naturais do modelo.

MODOS DE VIBRAÇÃO	VARIAÇÃO EM RELAÇÃO A FREQUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 1 (%)	
	DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 2	DISTRIBUIÇÃO DE MASSA 3
SWAY	0.00	0.00
SURGE	0.00	0.00
HEAVE	- 0.84	- 1.68
PITCH	+ 1.79	+ 5.36
ROLL	+ 2.40	+ 4.00
YAW	0.00	+ 4.76

IV.2.3 - Resposta no Tempo

Para obter os resultados da resposta no tempo dos sinais experimentais, foram analisados os sinais dos impactos dados com martelo dinâmico. Os martelos foram construídos adicionando uma haste de alumínio a um *loadcell*, para que este fosse capaz de medir as forças de impacto sobre o modelo, permitindo uma posterior comparação com resultados numéricos. Estes martelos foram testados dinamicamente para verificar a sua eficiência e podem ser vistos na figura IV.12.

A figura IV.4 (B) mostra esquematicamente o sistema utilizado para digitalização e tratamento dos sinais provenientes dos sensores.

Os ensaios foram realizados excitando alternadamente cada modo de vibração do modelo. Por isso serão mostradas as respostas no tempo devido à excitação de cada modo separadamente.

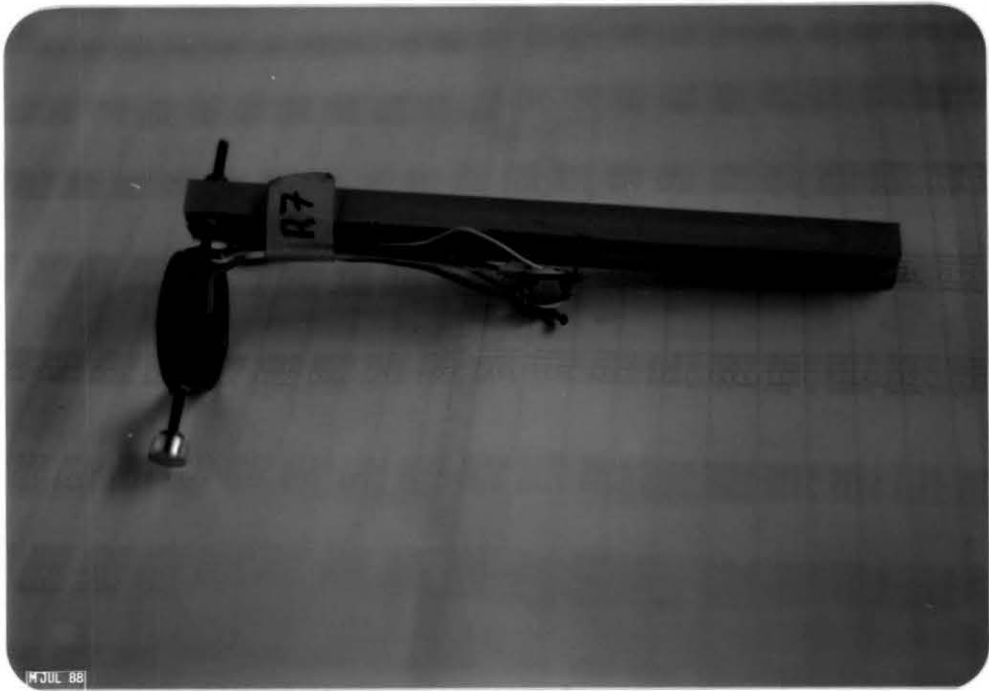


FIGURA IV.12 - Martelo Dinâmico.

IV.2.3.1- Respostas obtidas para impactos em sway

Para a excitação do modo sway de vibração, foram utilizados dois martelos, de maneira a tentar excitar somente este modo. Na figura IV.13 pode ser observada a localização dos impactos.

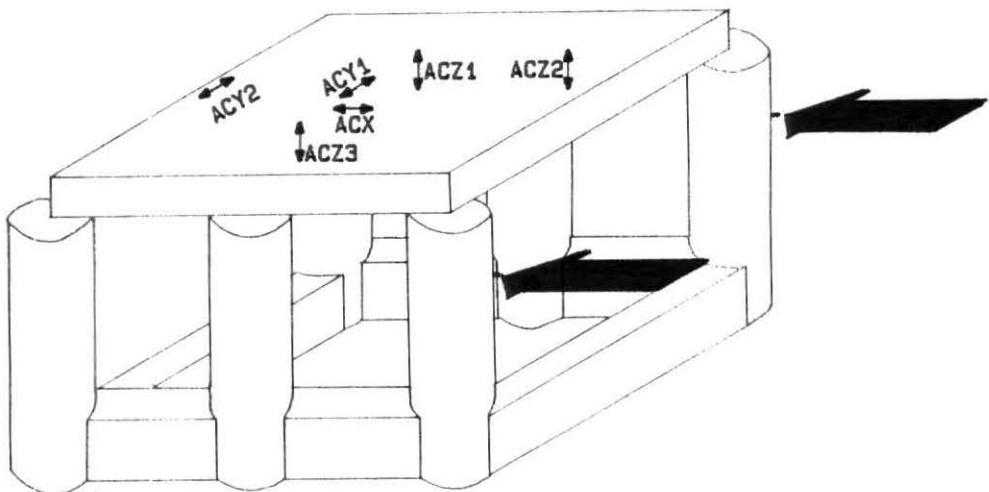


FIGURA IV.13 - Localização dos impactos em sway.

Na figura IV.14 podem ser observados os impactos e a resposta no tempo da aceleração quando da excitação do modo sway de vibração. As figuras IV.14 (A) e (B) mostram os impactos medidos e a figura IV.14 (C) mostra a aceleração na direção sway.

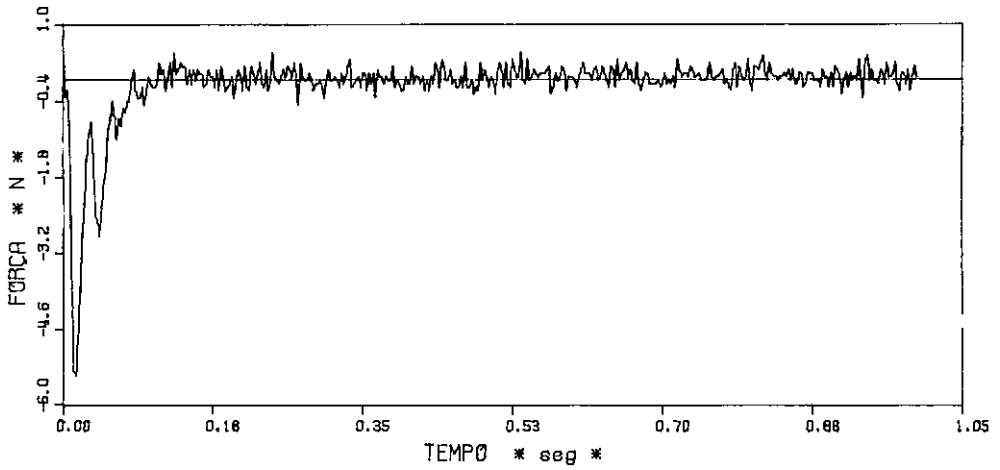
A figura IV.15 (A) mostra a aceleração na direção heave devido a esse mesmo impacto, enquanto que as figuras IV.15 (B) e (C) mostram os resultados da variação da força nos tendões 1 e 2 respectivamente.

Analisando os resultados pode-se facilmente chegar à conclusão de que estes se encontram acoplados, devido talvez à posição onde foram dados os impactos, pois o baricentro do modelo se encontra abaixo do nível da água, o que dificulta a excitação do modo sway somente, provocando acoplamento com o modo roll.

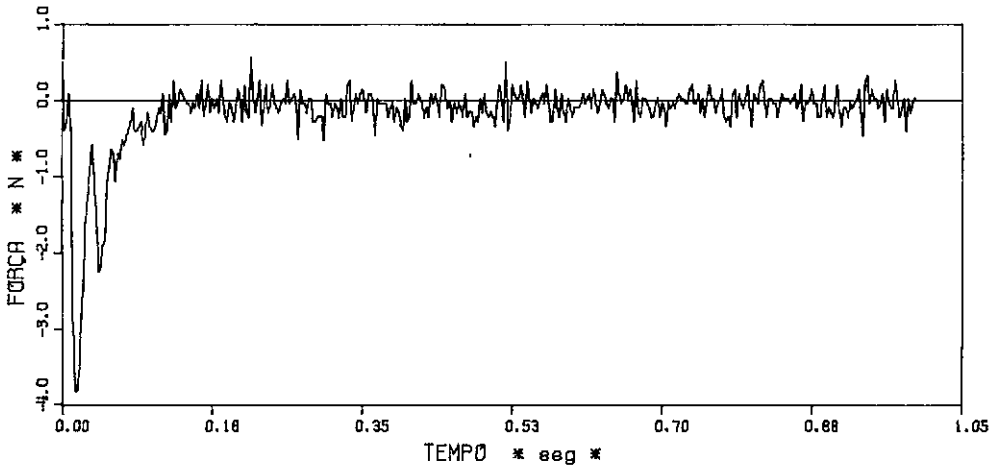
.

.

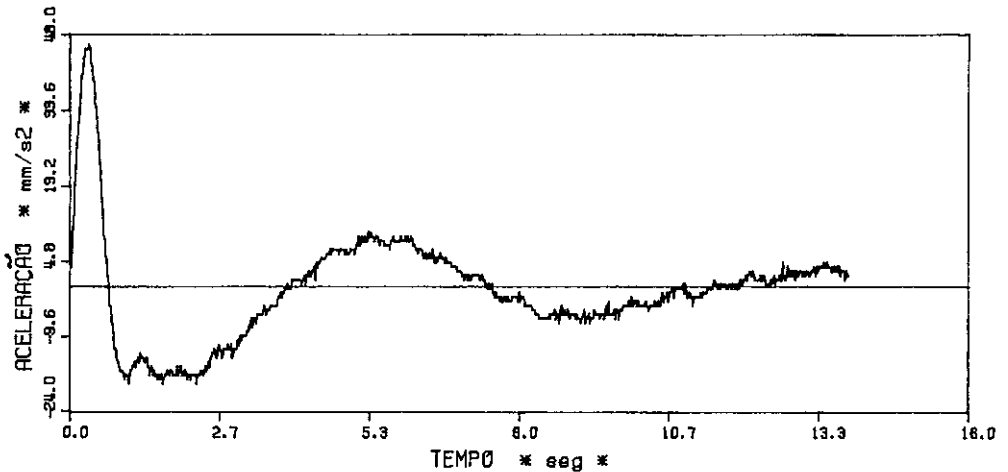
COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Força de impacto x tempo



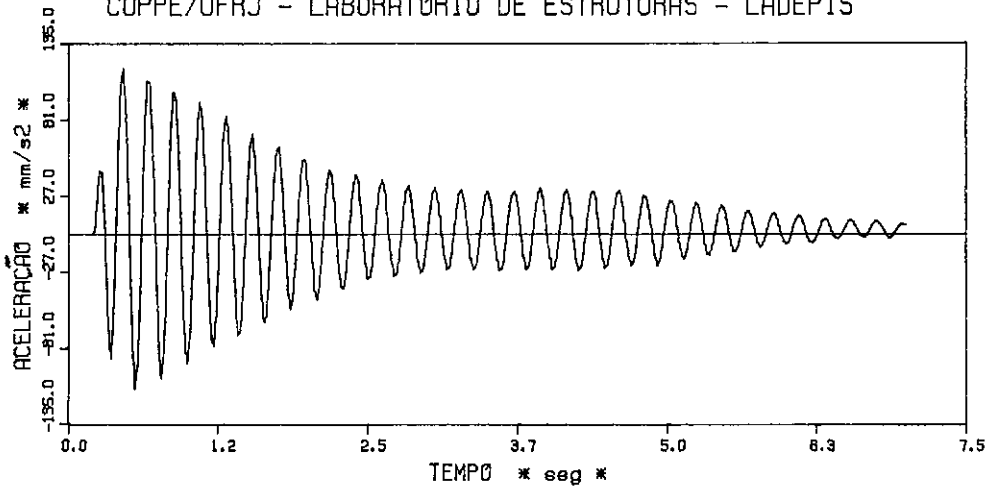
(B) - Força de impacto x tempo



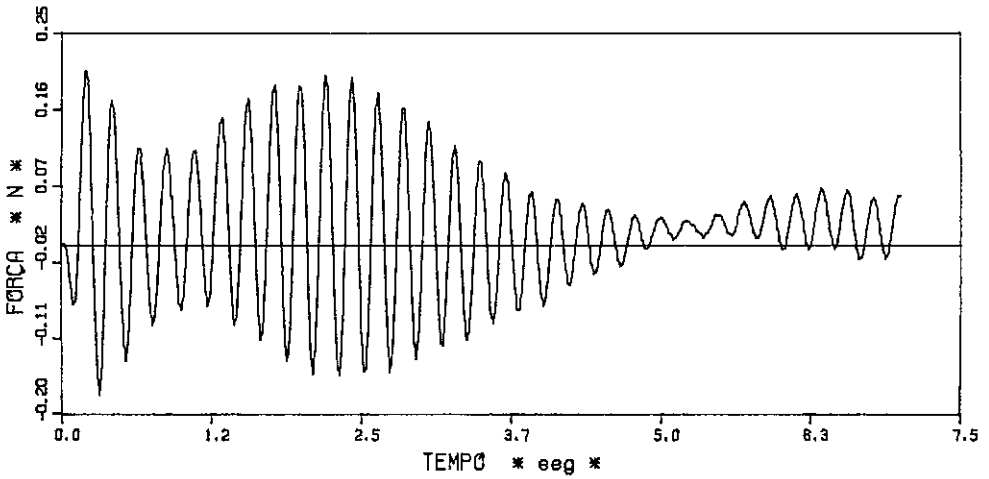
(C) - Resposta no tempo da aceleração na direção sway (ACX)

FIGURA IV.14 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo sway.

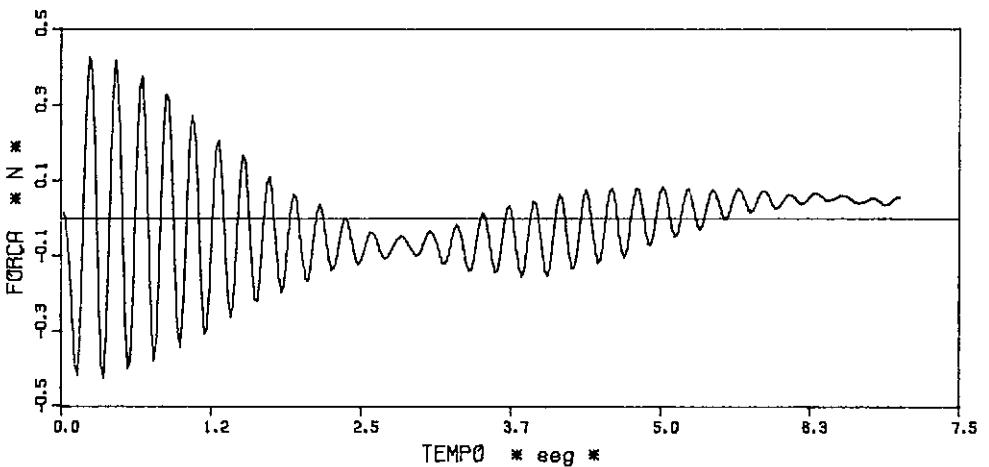
COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção heave (ACZ1)



(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1



(C) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA IV.15 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo sway.

IV.2.3.2- Respostas obtidas para impactos em surge

Para excitar o modelo no modo surge foi necessária a utilização de somente um martelo, cuja força de impacto no tempo pode ser observada na figura IV.17 (A), e cuja localização pode ser vista na figura IV.16.

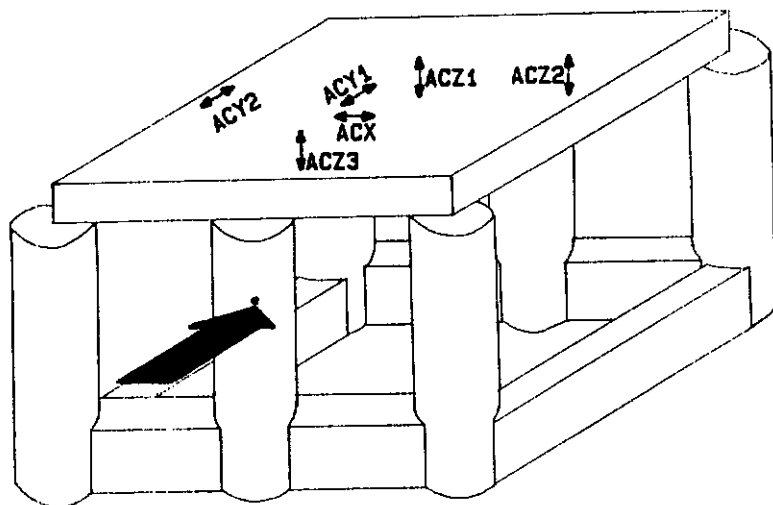


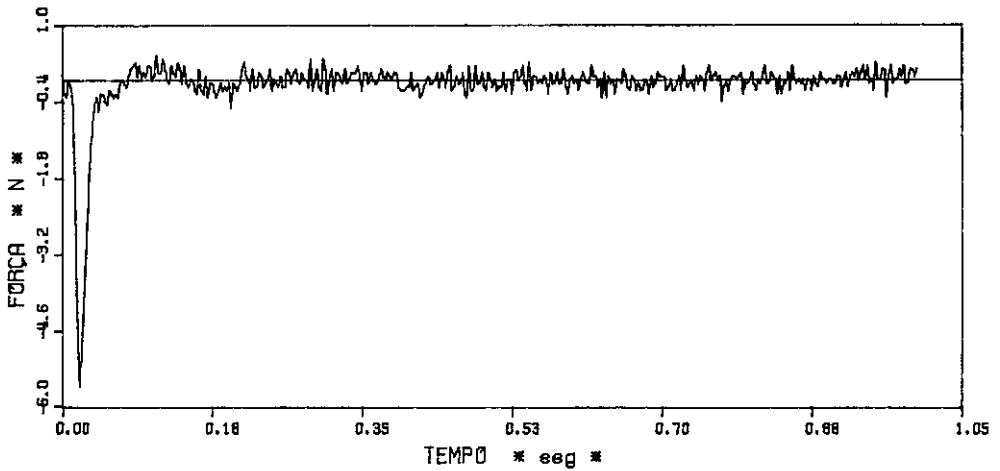
FIGURA IV.16 - localização dos impactos em surge.

Na figura IV.17 (B) pode ser vista a resposta no tempo da aceleração na direção do impacto, ou seja, na direção surge. Já a figura IV.17 (C) mostra o resultado no tempo da aceleração na direção heave devido ao impacto excitando o modo surge.

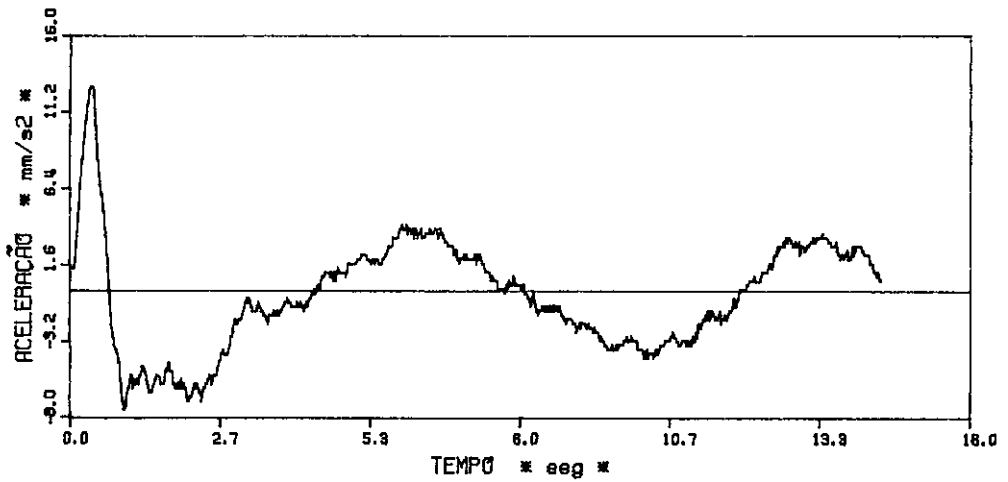
As figuras IV.18 (A) e (B) e as figuras IV.19 (A) e (B) mostram os resultados obtidos da variação da força nos tendões 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Cabe lembrar que a pré-tensão inicial de cada tendão equivale a aproximadamente 7 N, e que está sendo mostrada somente a variação da força nestes tendões.

Novamente pode ser observado um acoplamento entre o modo excitado, surge, e o modo pitch, devido ao mesmo motivo exposto para o item IV.2.3.1.

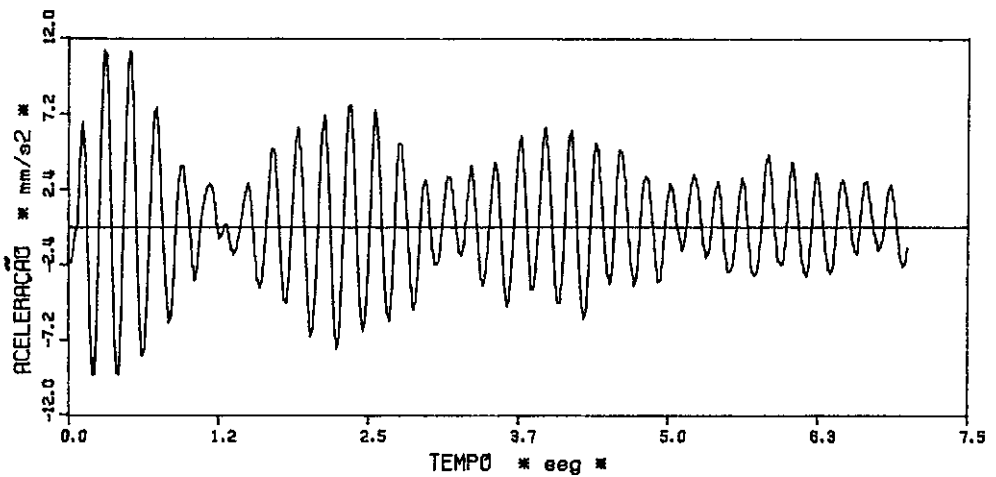
COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Força de impacto x tempo

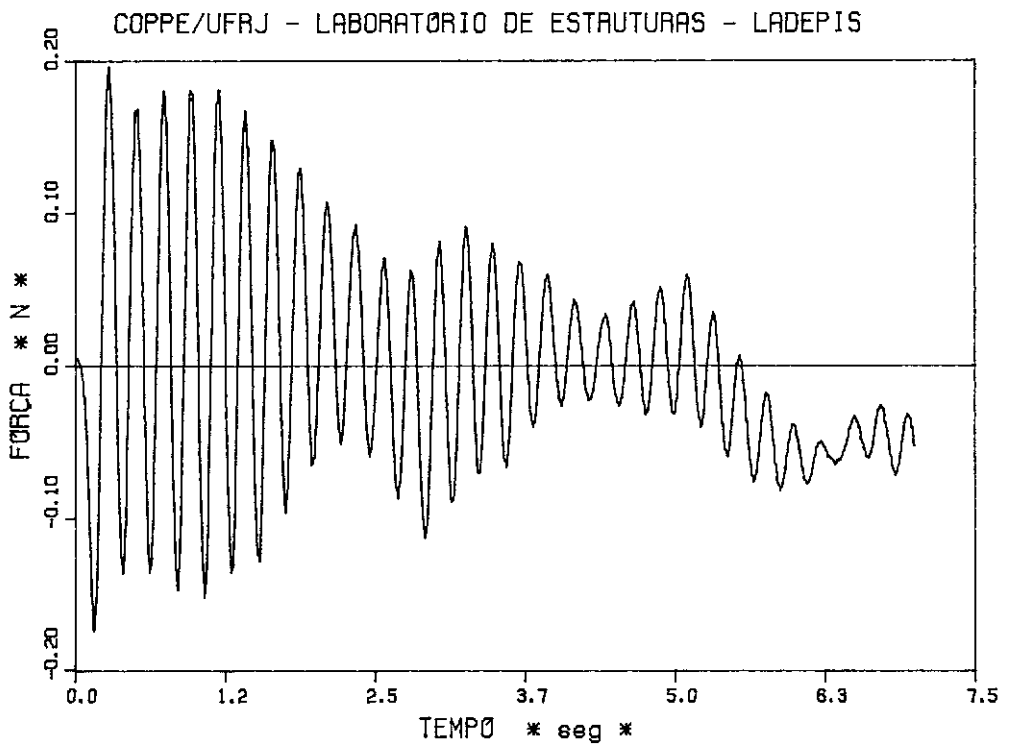


(B) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge (ACY1)

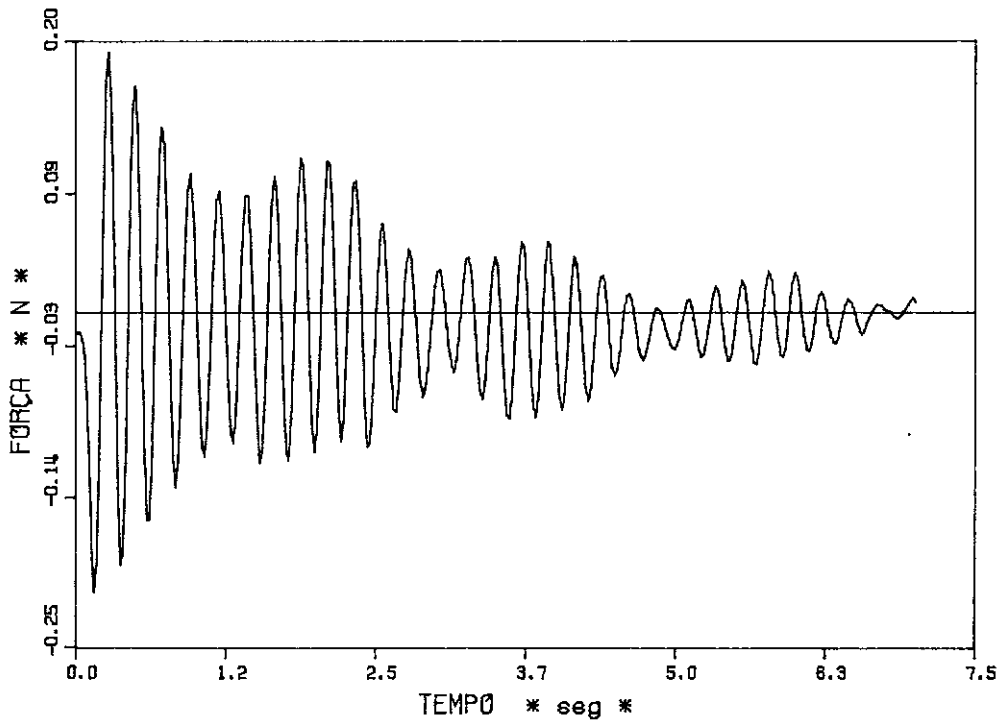


(C) - Resposta no tempo da aceleração na direção heave (ACZ1)

FIGURA IV.17 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo surge.



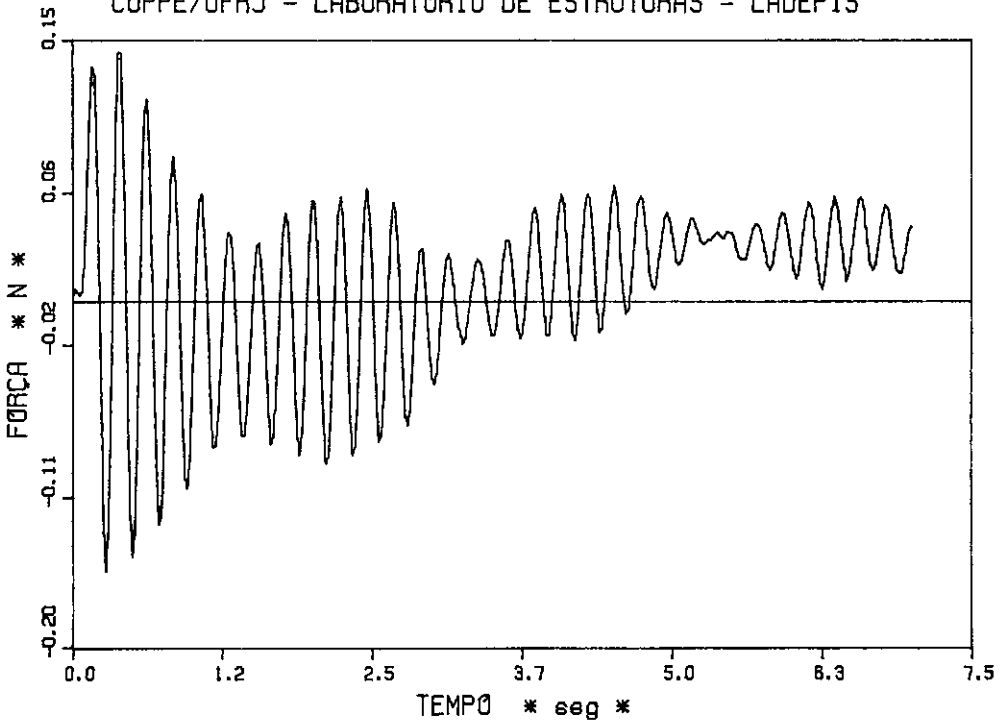
(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1



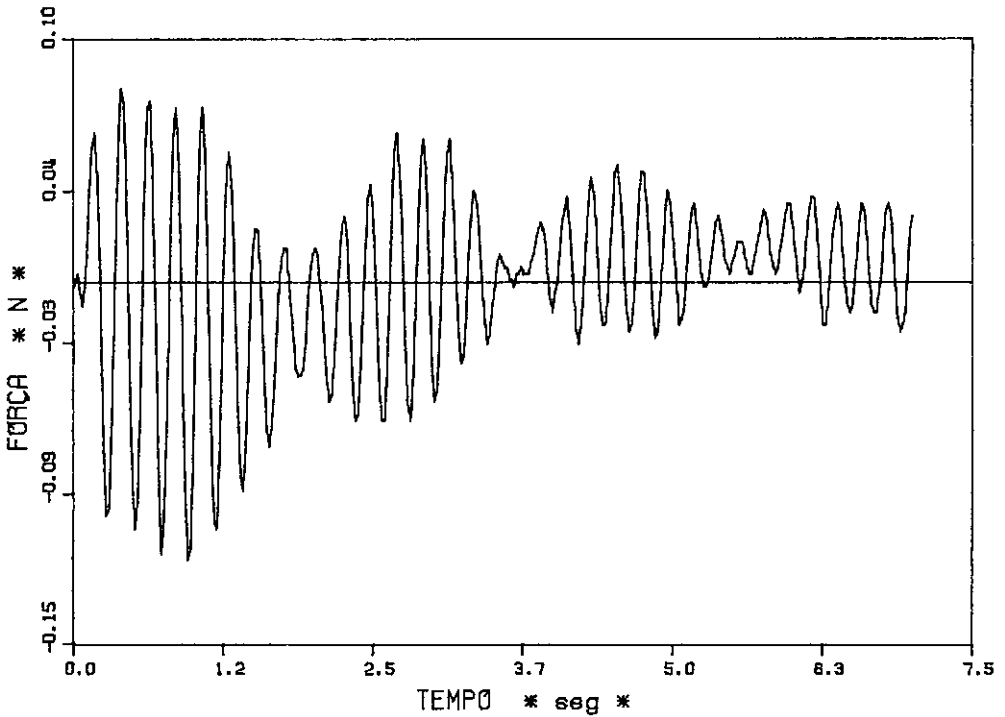
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA IV.18 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 3



(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 4

FIGURA IV.19 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo surge.

IV.2.3.3- Respostas obtidas para impactos em heave

Para excitar o modo heave de vibração do modelo foi utilizado somente um martelo dinâmico, sendo que desta vez foi possível se excitar o modelo diretamente sobre o seu baricentro (figura IV.20).

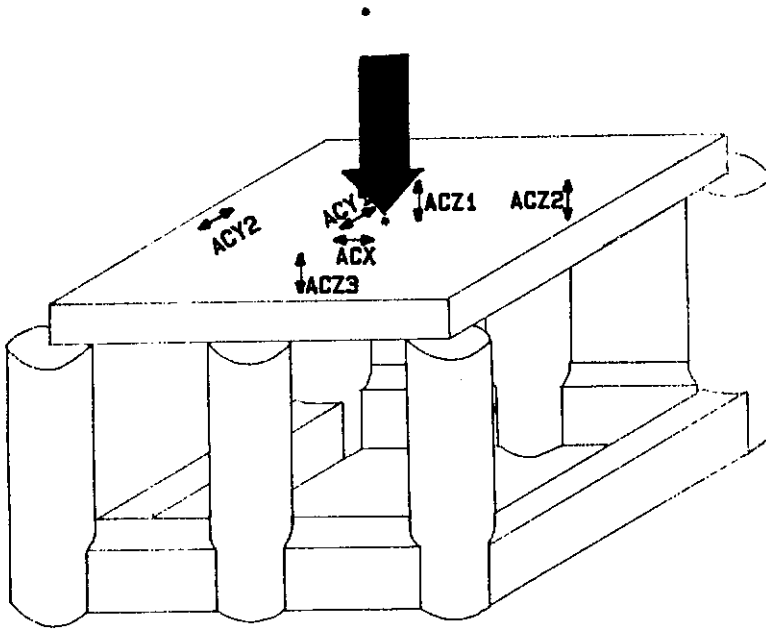
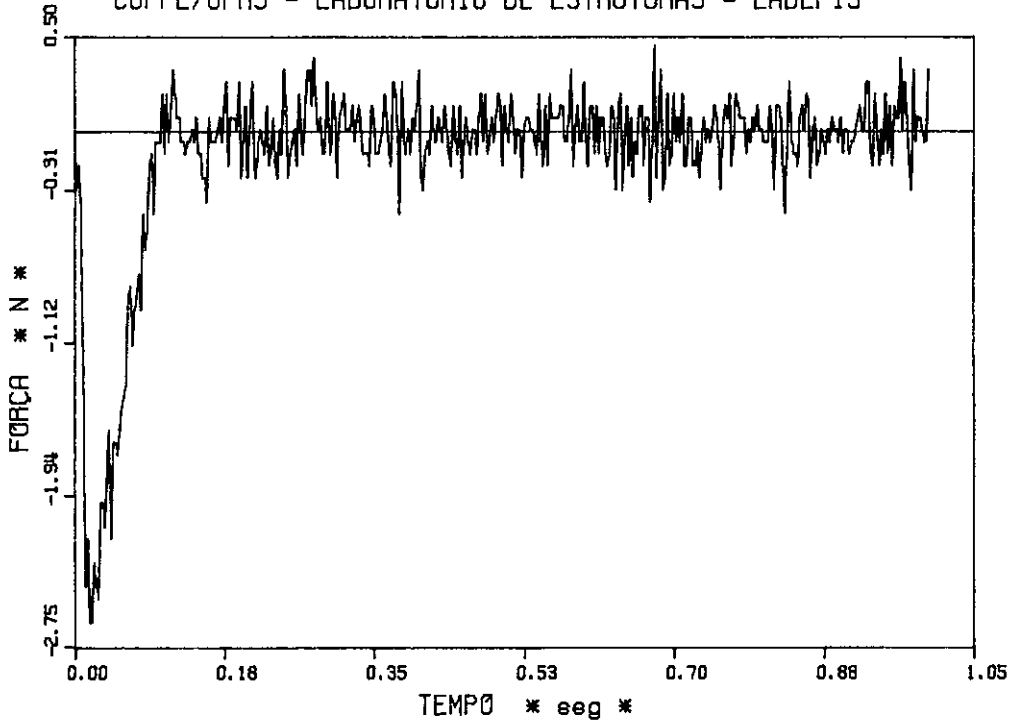


Figura IV.20 - Localização dos impactos em heave.

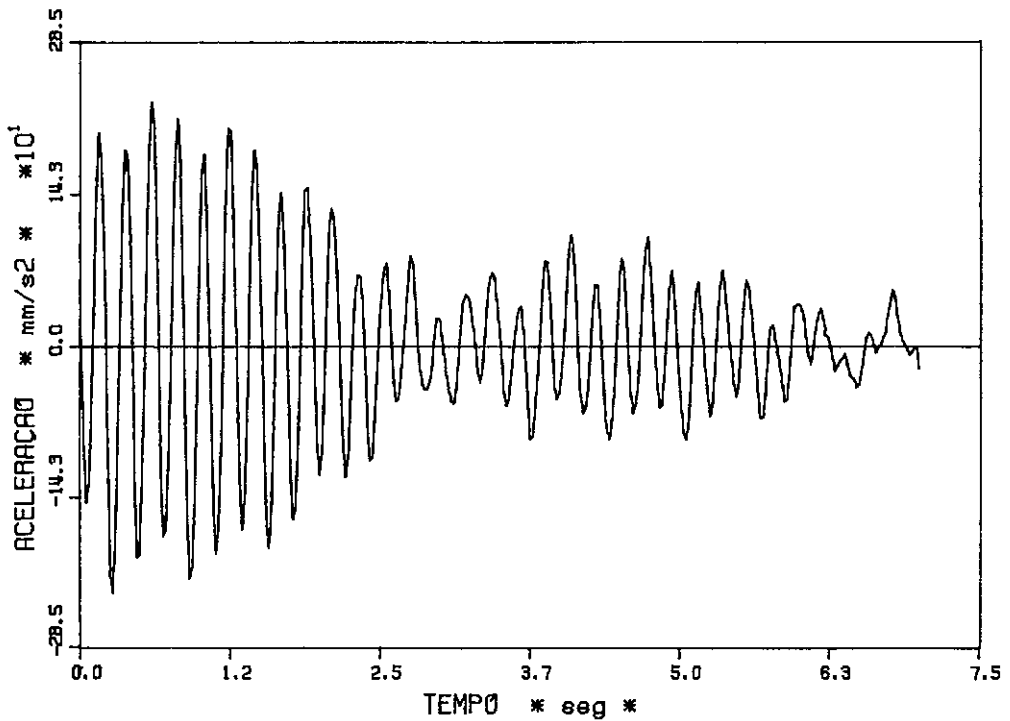
Na figura IV.21 (A) pode ser visto o sinal do impacto excitando o modo heave, e na figura IV.21 (B) temos a resposta no tempo da aceleração na direção heave devido a esse impacto.

As respostas no tempo observadas nas figuras IV.22 (A) e (B) correspondem respectivamente à variação da força nos tendões 1 e 2, onde pode ser notado um acoplamento, provavelmente devido a imperfeições do modelo.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



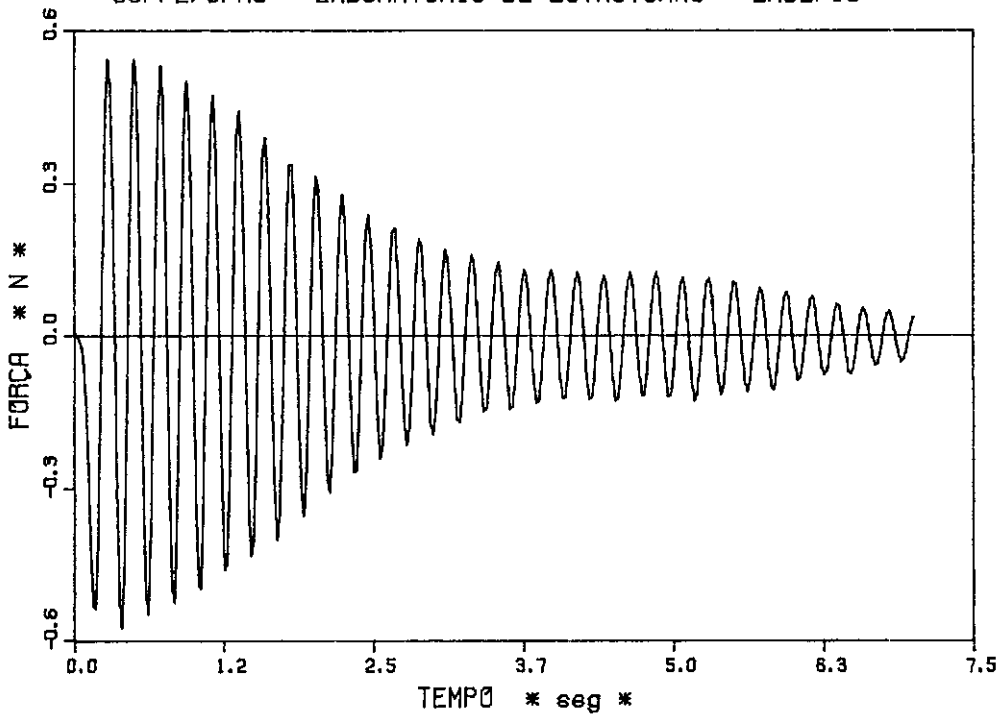
(A) - Força de impacto x tempo



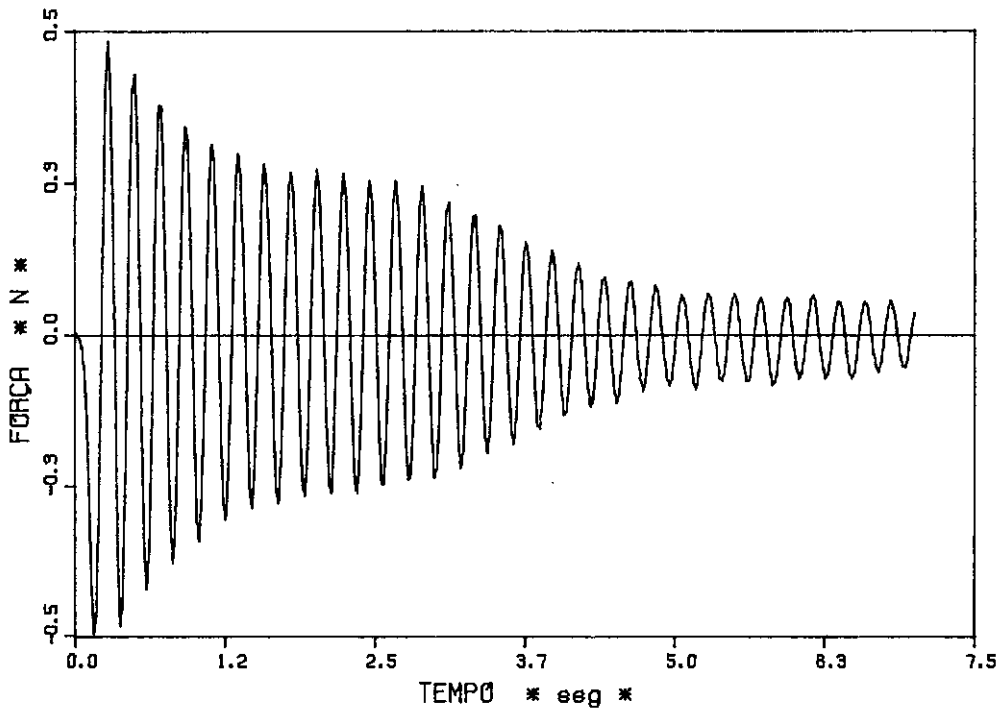
(B) - Resposta no tempo da aceleração na direção heave (ACZ1)

FIGURA IV.21 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo heave.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1



(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA IV.22 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo heave.

IV.2.3.4- Respostas obtidas para impactos em pitch

A localização do impacto excitando o modo pitch de vibração pode ser visto na figura IV.23. Desta vez o objetivo foi tentar dar o impacto em uma posição mais distante do baricentro, para que se excitasse mais o modo pitch de rotação do modelo.

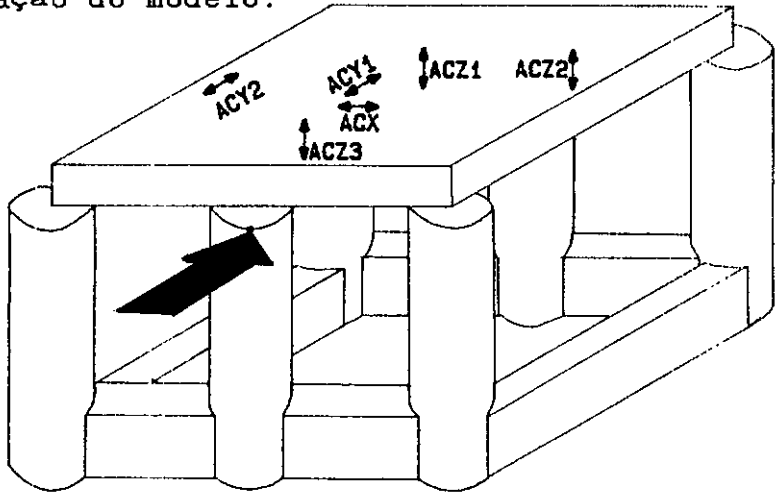


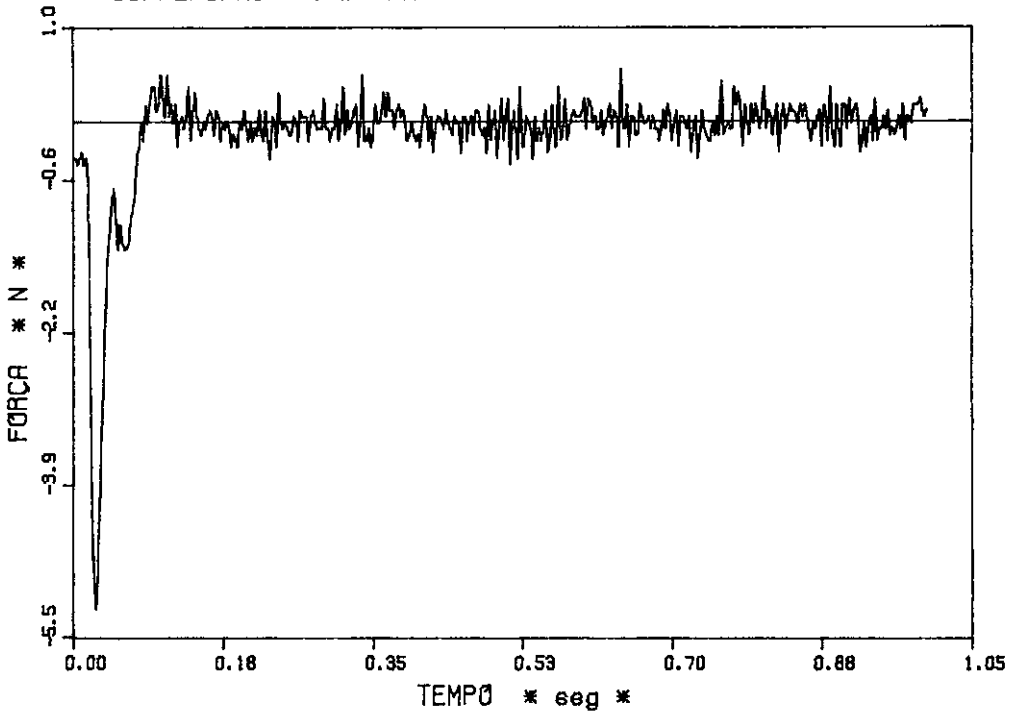
Figura IV.23 - Localização dos impactos em pitch.

Na figura IV.24 (A) podemos ver a força de impacto medida no tempo, e na figura IV.24 (B) temos a resposta no tempo da rotação calculada de acordo com o item IV.1.

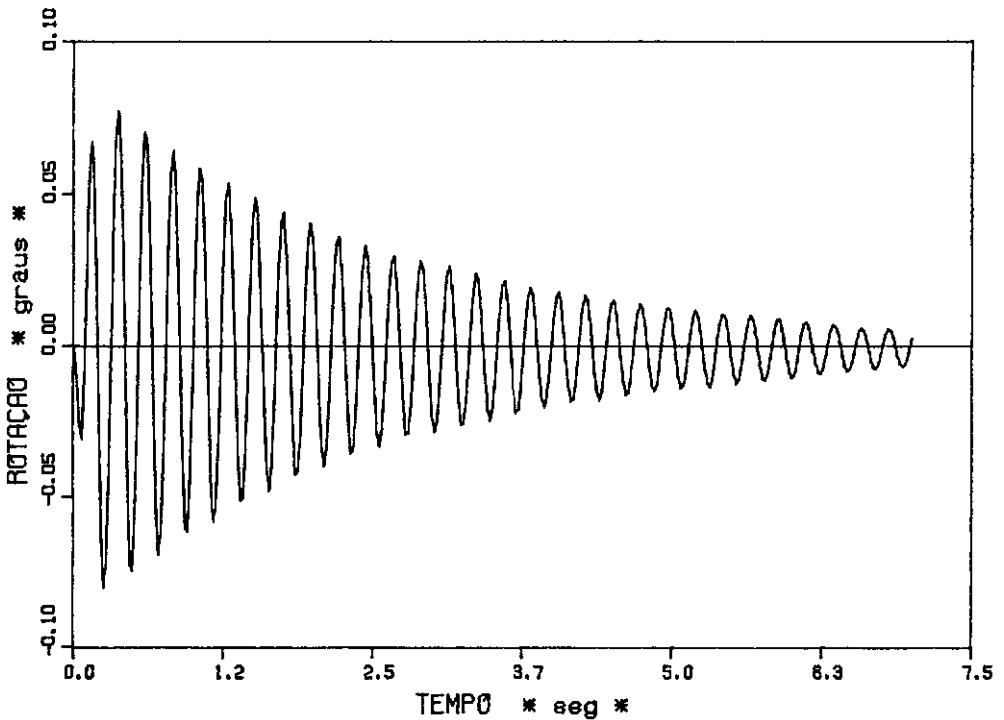
A resposta no tempo da variação da força no tendão 1 pode ser observada na figura IV.25 (A), e da força no tendão 2 pode ser vista na figura IV.25 (B).

Com estas figuras pode-se reparar que as respostas no tempo das forças se encontram acopladas provavelmente com o modo heave, enquanto que o sinal da rotação não apresenta acoplamento, já que os sinais dos dois acelerômetros na direção heave ($ACZ1$ e $ACZ3$) foram diminuídos para cálculo dessa rotação.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



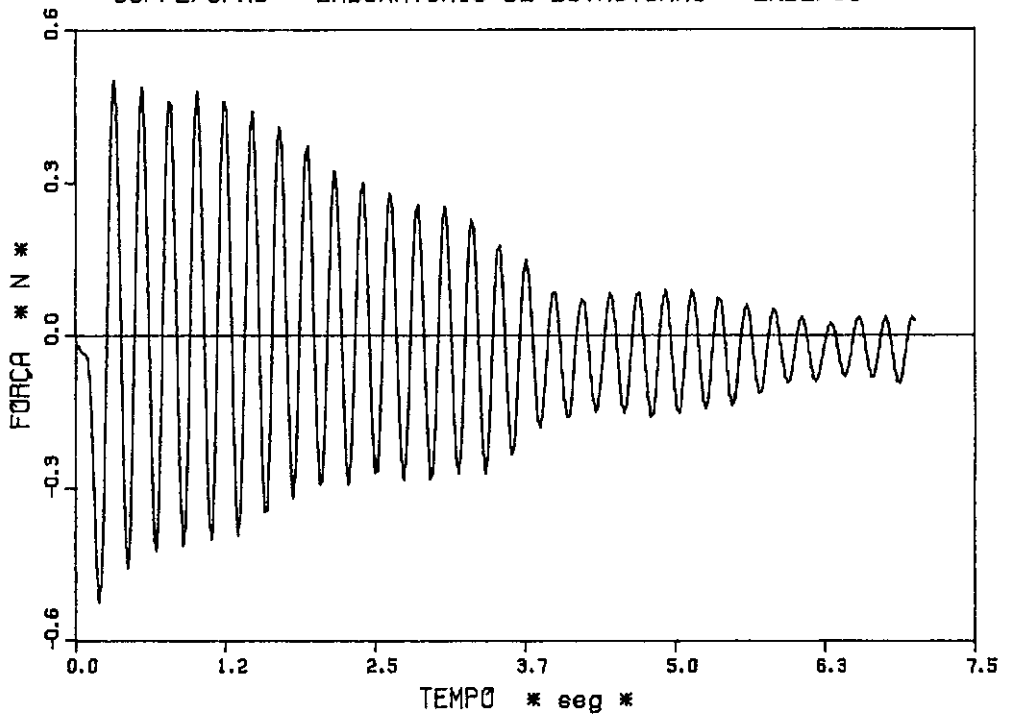
(A) - Força de impacto x tempo



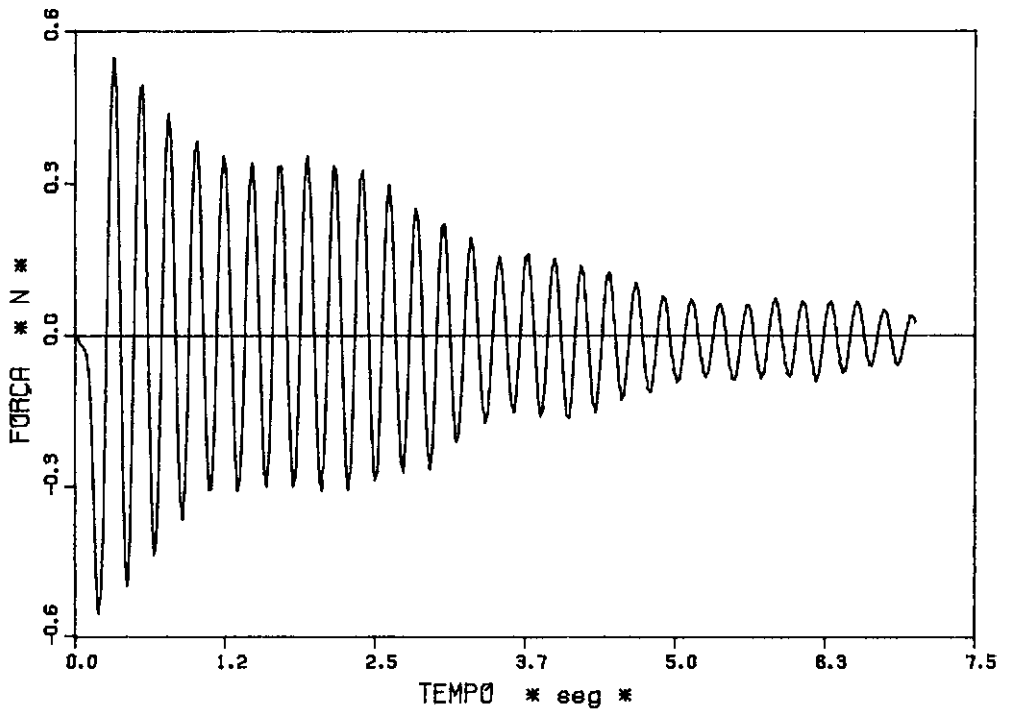
(B) - Resposta no tempo da rotação na direção pitch

FIGURA IV.24 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo pitch.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1



(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA IV.25 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo pitch.

IV.2.3.5- Respostas obtidas para impactos em roll

Para excitar o modo roll, foram dados impactos com dois martelos dinâmicos, de modo a excitar principalmente o modo roll, de acordo com a figura IV.26.

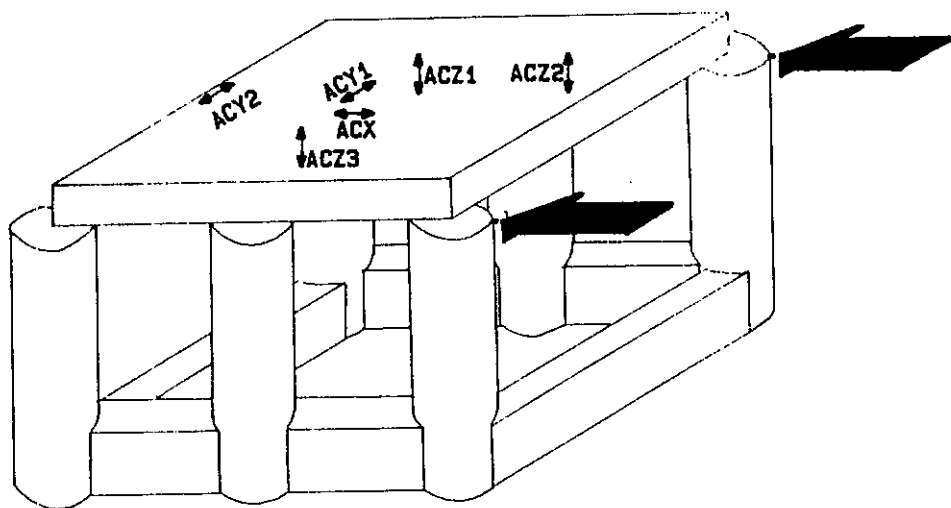


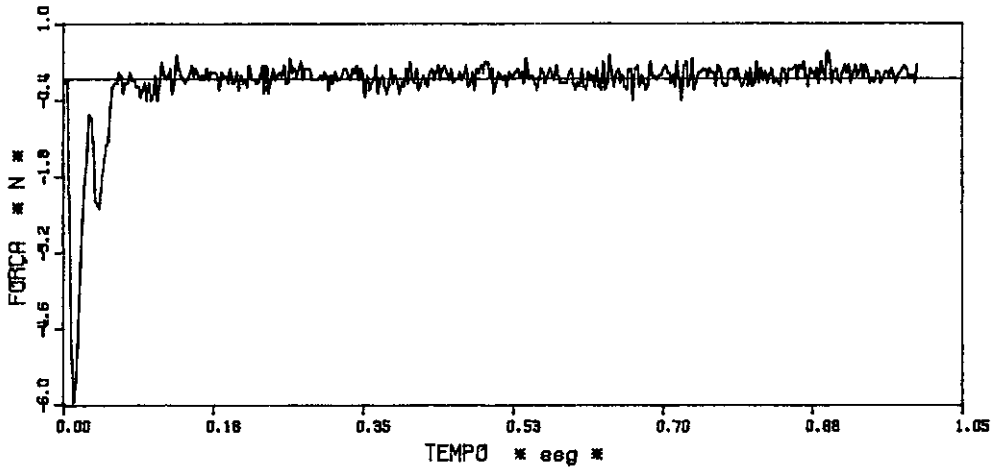
Figura IV.26 - Localização dos impactos em roll.

Nas figuras IV.27 (A) e (B) podem ser vistos os impactos a que se submeteu o modelo para excitar o modo roll, enquanto que na figura IV.27 (C) pode ser observada a rotação do modelo na direção roll.

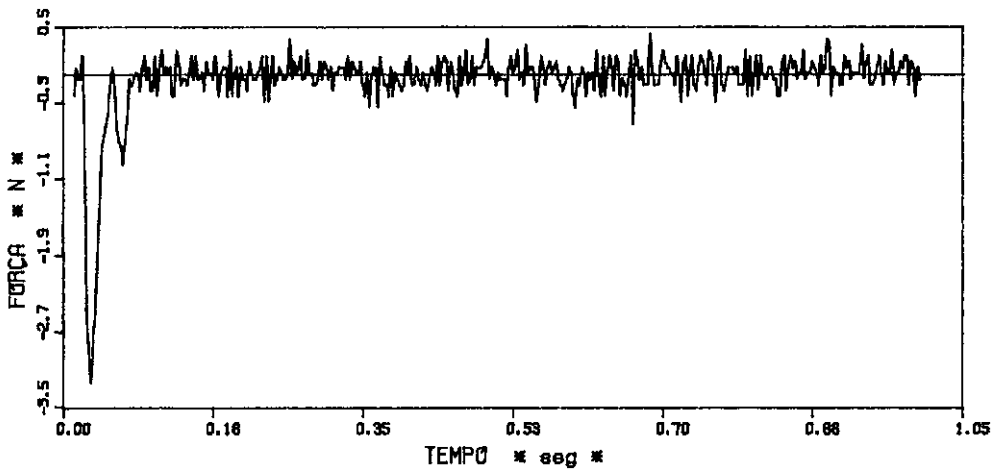
A variação da força nos tendões 1 e 2 pode ser vista na figura IV.28 (A) e (B) respectivamente.

Pode-se notar novamente um forte acoplamento na resposta do modelo, provavelmente com heave, principalmente na variação de força nos tendões.

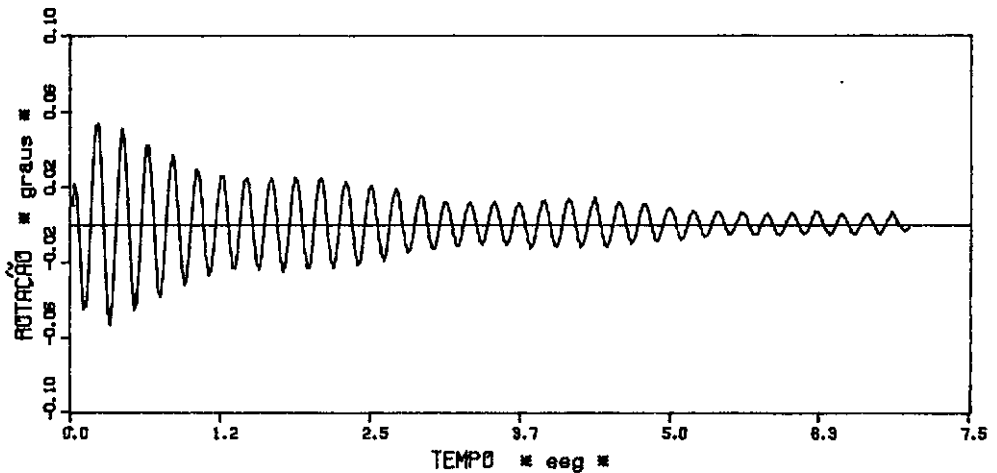
COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Força de impacto x tempo



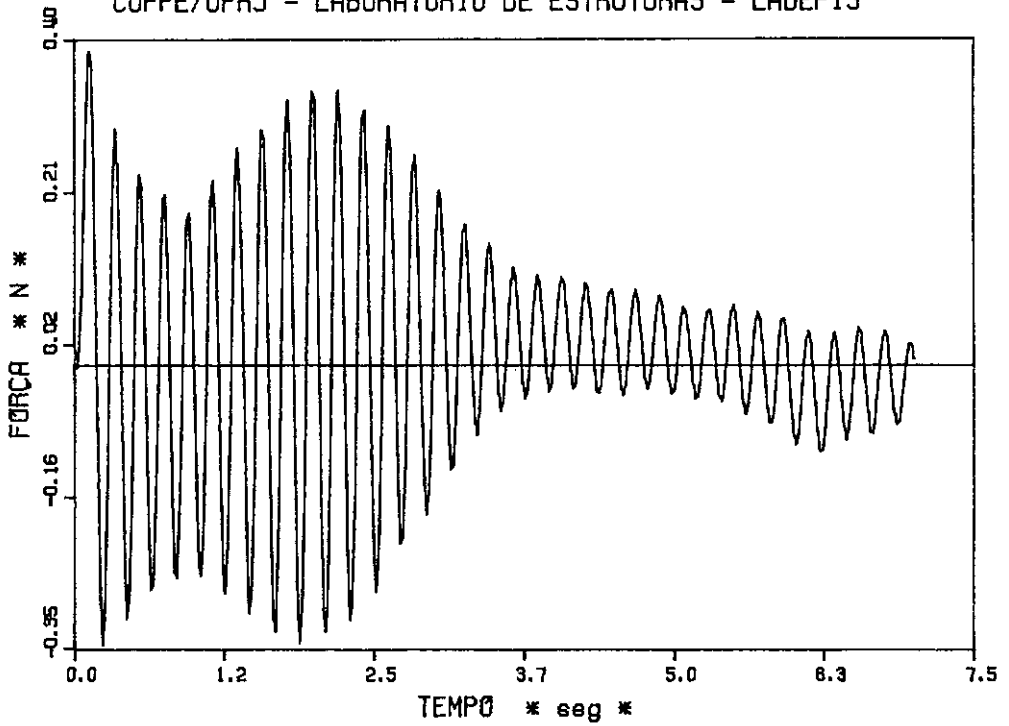
(B) - Força de impacto x tempo



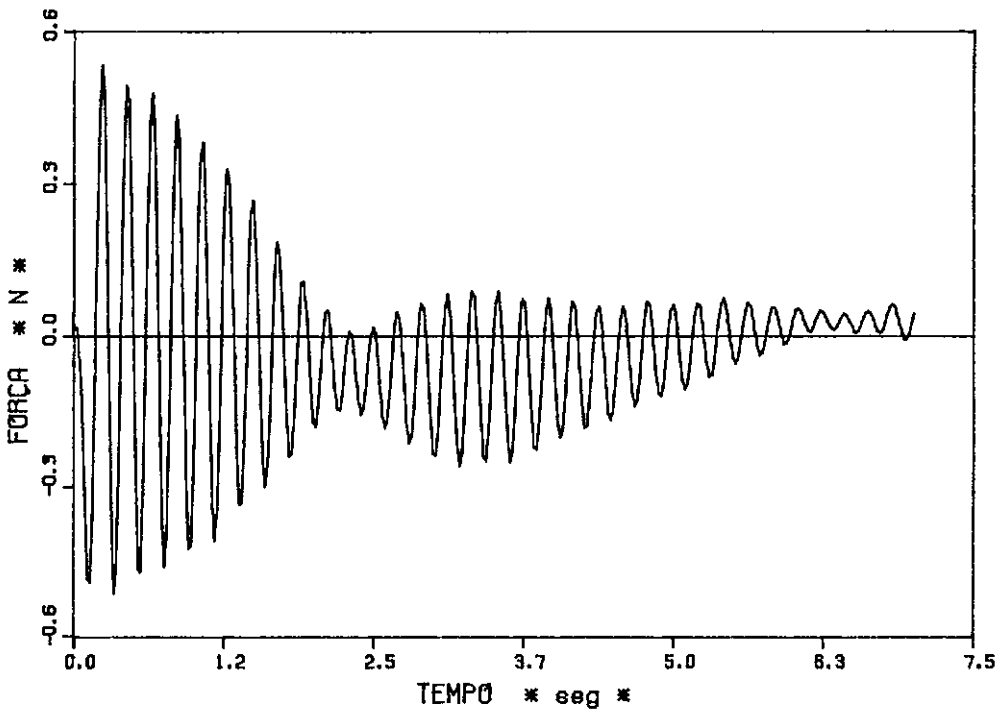
(C) - Resposta no tempo da rotação na direcção roll

FIGURA IV.27 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo roll.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1



(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA IV.28 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo roll.

IV.2.3.6- Resposta obtidas para impactos em yaw

Os impactos dados para excitar o modo yaw de vibração podem ser vistos na figura IV.29. A resposta no tempo dos impactos dados com o auxílio dos dois martelos dinâmicos podem ser vistas nas figuras IV.30 (A) e (B).

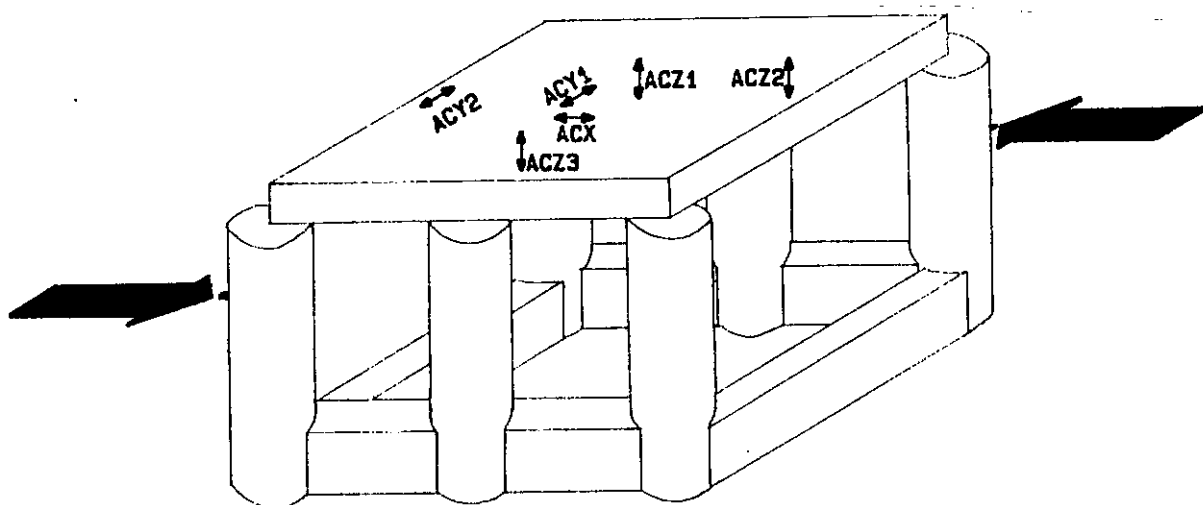
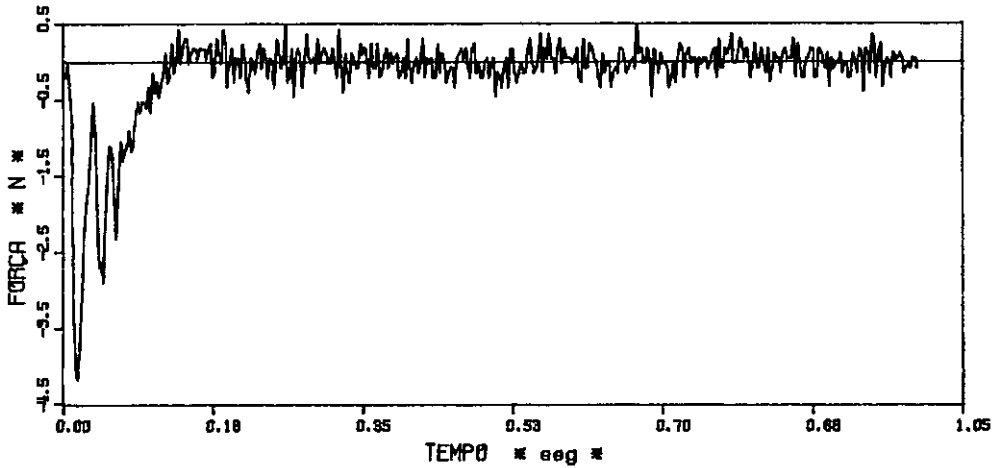


Figura IV.29 - Localização dos impactos em yaw.

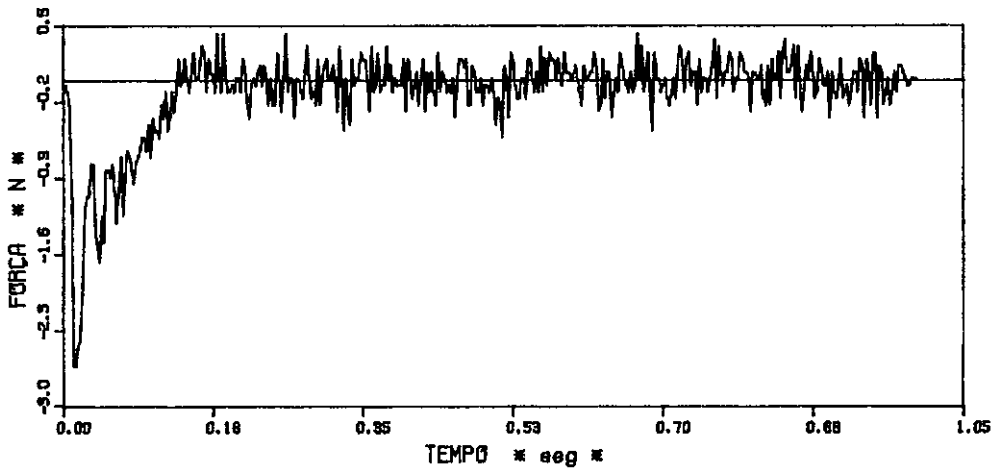
A rotação do modelo devido a esses impactos foram calculadas de acordo com o item IV.1 e pode ser vista na figura IV.30 (C), onde pode ser observado que a resposta no tempo não apresenta acoplamentos, já que os acelerômetros utilizados no cálculo desta rotação (ACY1 e ACY2) estão locados na direção do eixo y, não captando acelerações na direção heave.

Nas figuras IV.31 (A) e (B) podem ser observadas a variação da força nos tendões 2 e 3 respectivamente, onde são vistos acoplamentos da resposta no tempo com o modo heave.

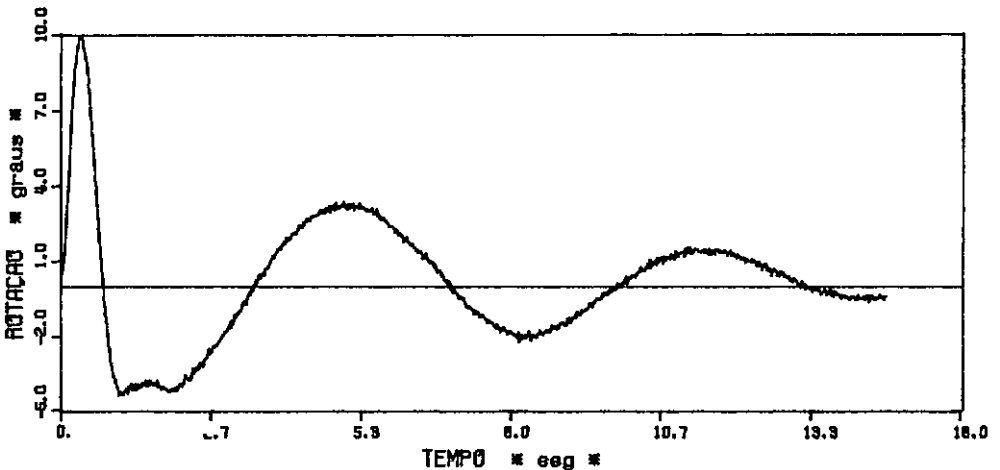
COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Força de impacto x tempo



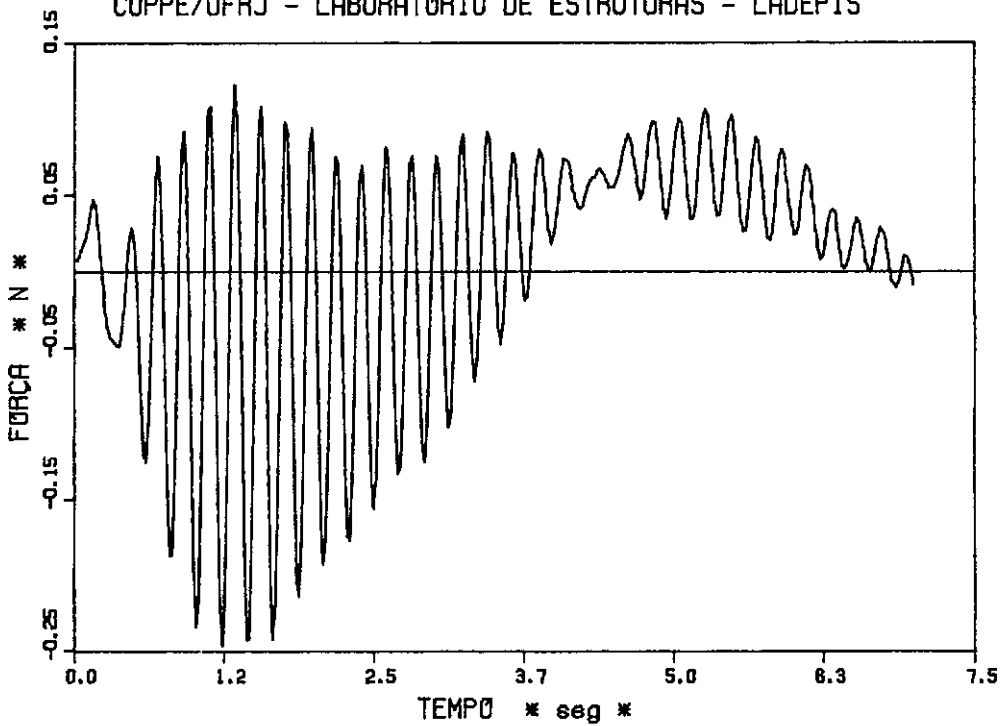
(B) - Força de impacto x tempo



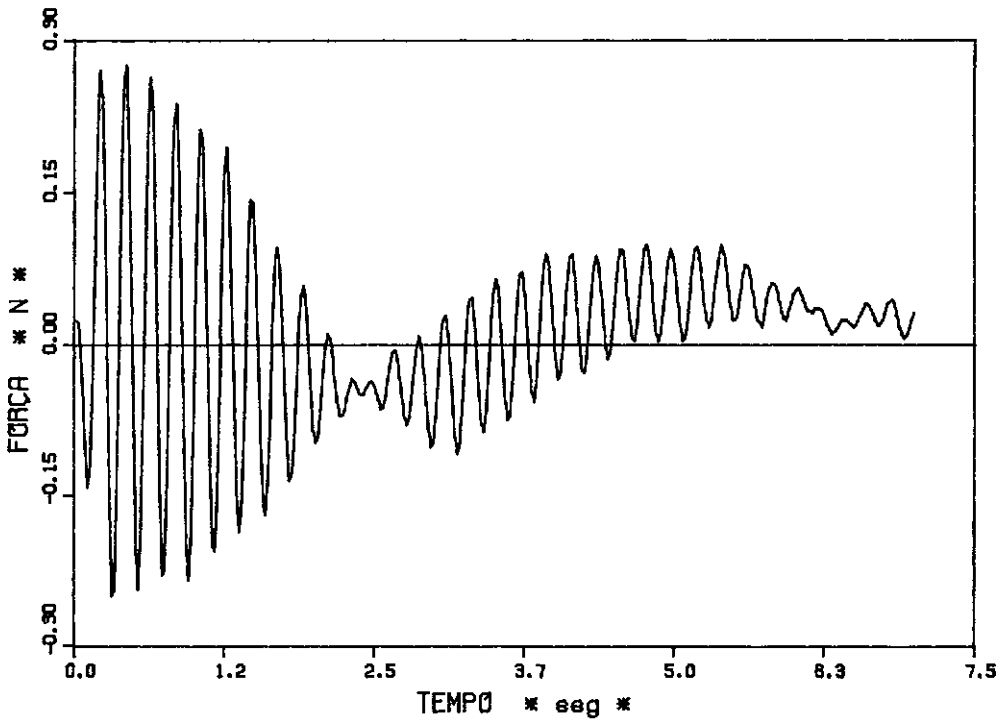
(C) - Resposta no tempo de rotação na direção yaw

FIGURA IV.30 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo yaw.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2



(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 3

FIGURA IV.31 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando o modo yaw.

IV.2.4 - Análise da Taxa de Amortecimento

A taxa de amortecimento foi calculada utilizando a técnica do decremento logarítmico sobre os sinais de resposta no tempo dos impactos com o dedo sobre o modelo (figuras IV.32 e IV.33). O número de ciclos utilizado para o cálculo da taxa de amortecimento foi aquele que provocava redução na amplitude da ordem de 50% . O amortecimento dos modos de translação podem ser observados na tabela IV.5, relacionados com o número adimensional correspondendo ao deslocamento imposto ao modelo dividido pelo diâmetro externo de uma coluna. Já na tabela IV.6, pode ser observado o amortecimento dos modos de rotação do modelo, relacionado diretamente com a rotação do modo correspondente.

As tabelas IV.5 e IV.6 fornecem portanto a taxa de amortecimento para os seis principais modos de vibração em função de parâmetros adimensionais, e por isso podem ser utilizadas diretamente para a obtenção de valores de taxa de amortecimento de protótipos de TLP com características similares ao modelo em estudo.

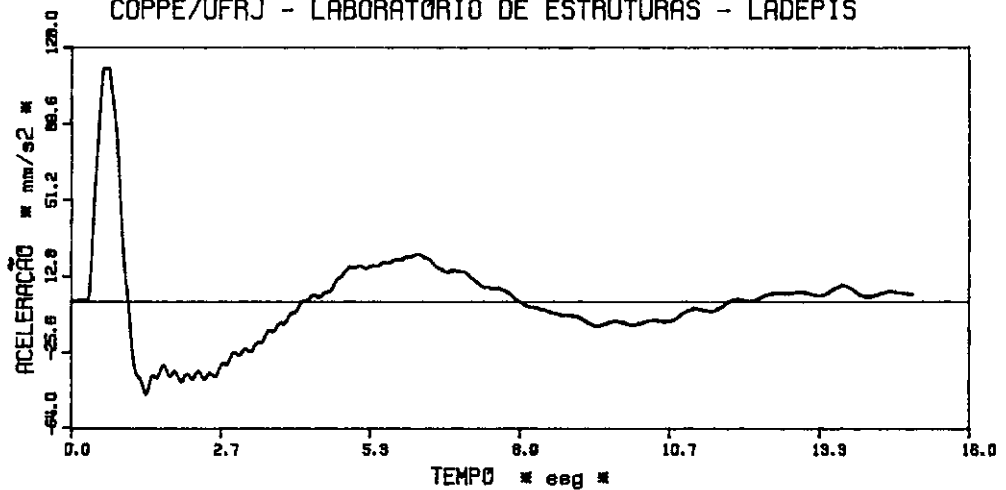
Tabela IV.5 - Amortecimento para os modos de translação.

MODOS DE VIBRAÇÃO	DESLOCAMENTO DIÂMETRO DA COLUMNA	AMORTECIMENTO ξ (%)
SWAY	0.200 - 0.270	7.0 - 11.0
	0.270 - 0.370	11.0 - 14.0
	0.370 - 0.500	14.0 - 16.0
	0.500 - 0.750	16.0 - 18.0
	0.750 - 1.250	18.0 - 20.0
SURGE	0.050 - 0.065	8.5 - 10.0
	0.065 - 0.085	10.0 - 11.5
	0.085 - 0.110	11.5 - 12.5
	0.110 - 0.160	12.5 - 13.0
	0.160 - 0.250	13.0 - 13.5
HEAVE	0.0115 - 0.0145	1.0 - 1.4
	0.0145 - 0.0175	1.4 - 1.8
	0.0175 - 0.0215	1.8 - 2.1
	0.0215 - 0.0325	2.1 - 2.3

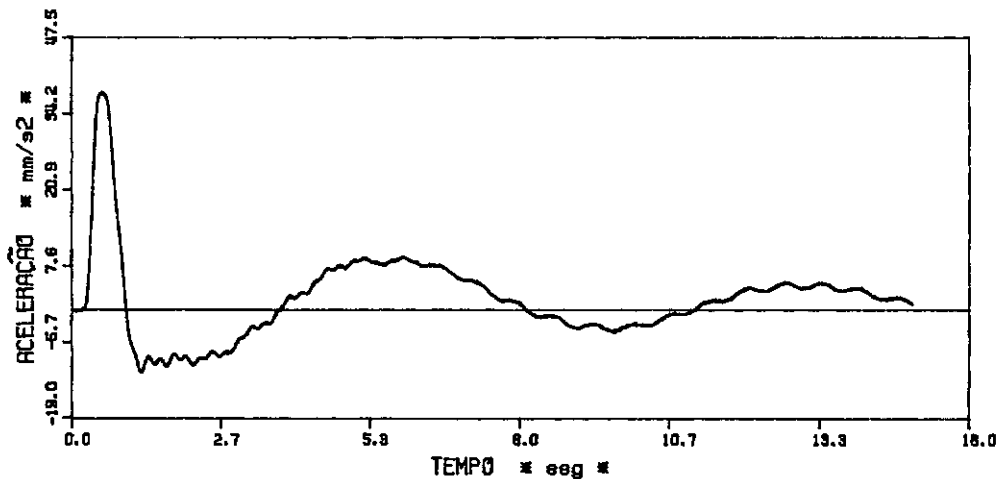
Tabela IV.6 - Amortecimento para os modos de rotação.

MODOS DE VIBRAÇÃO	ROTAÇÃO (GRAUS)	AMORTECIMENTO ξ (%)
PITCH	0.10 - 0.35	1.47
ROLL	0.04 - 0.15	1.35
YAW	8.75 - 10.00	3.0 - 3.7
	10.00 - 11.00	3.7 - 4.6
	11.00 - 12.00	4.6 - 5.8
	12.00 - 13.00	5.8 - 7.8
	13.00 - 13.50	7.8 - 12.4

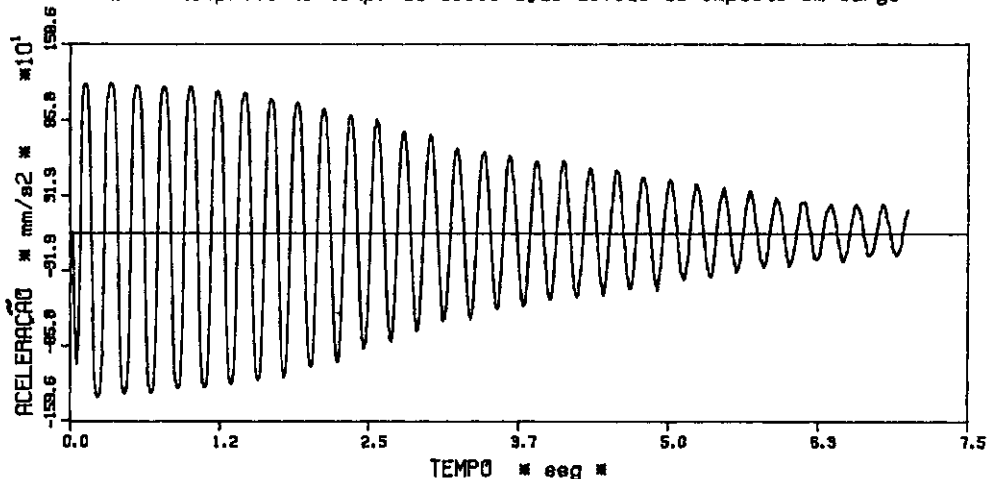
COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da aceleração devido ao impacto em sway



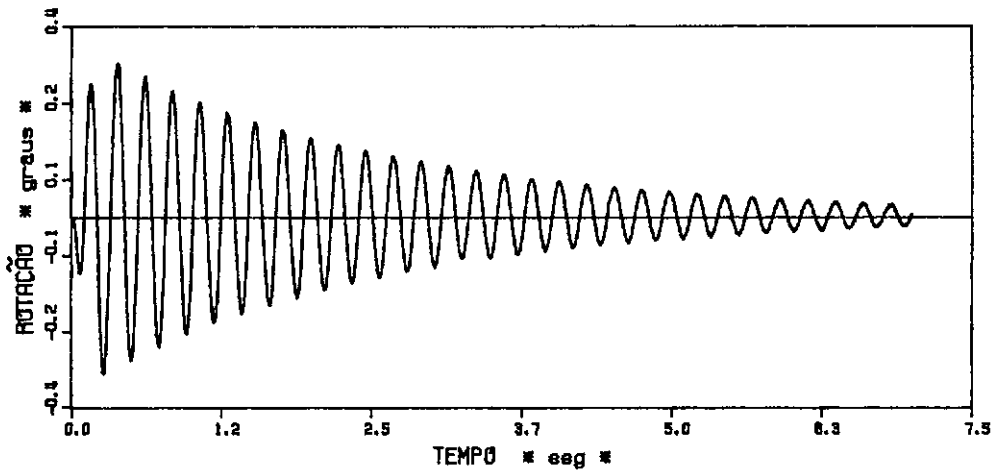
(B) - Resposta no tempo da aceleração devido ao impacto em surge



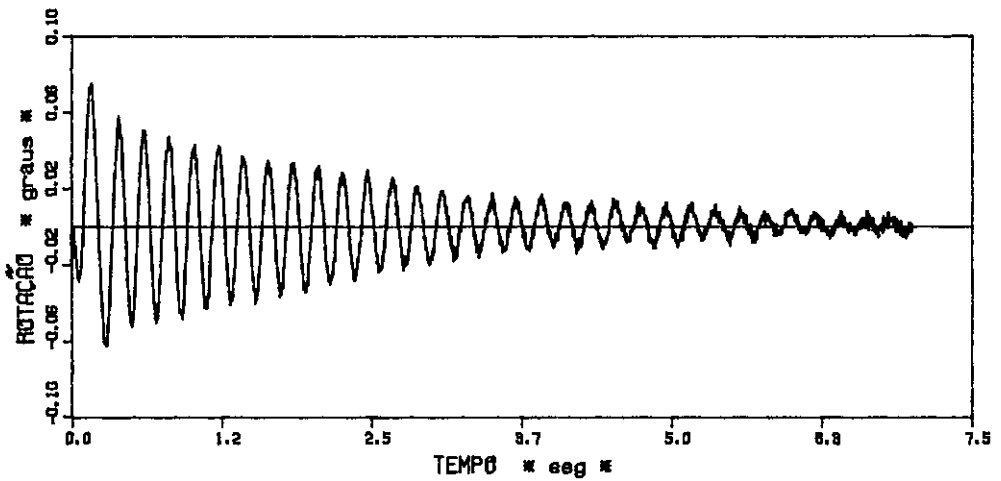
(C) - Resposta no tempo da aceleração devido ao impacto em heave

FIGURA IV.32 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando cada modo para análise do amortecimento.

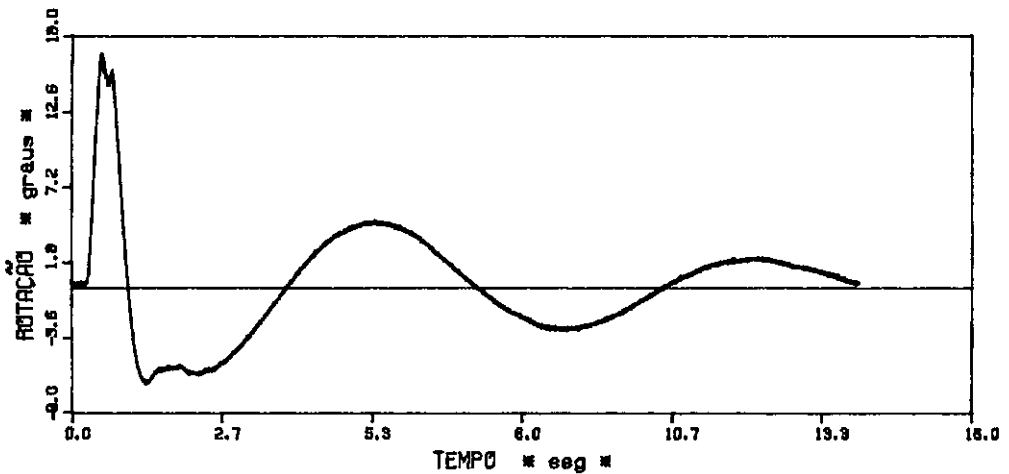
COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da rotação devido ao impacto em pitch



(B) - Resposta no tempo da rotação devido ao impacto em roll



(C) - Resposta no tempo da rotação devido ao impacto em yaw

FIGURA IV.33 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de impactos excitando cada modo para análise do amortecimento.

IV.3 - Ensaios sob Ação de Ondas

Nos ensaios sob ação de ondas, o modelo foi rotacionado em torno do eixo z, aplicando-se uma rotação na placa de fundação, para simular ondas com diferentes ângulos de incidência atuando sobre o modelo. Com isso foi possível analisar o comportamento do modelo sob ação de ondas incidindo com 0° , 30° , 60° e 90° com a direção surge.

Para medir as ondas foi utilizado um ondômetro capacitivo desenvolvido pela COPPE [5]. As ondas utilizadas nos ensaios foram reduzidas em escala (equações II.1 e II.3) a partir das ondas características da costa brasileira. Por isso foram utilizadas nos ensaios ondas com alturas que variavam de 50 a 65 mm e com frequências variando de 1,10 a 1,12 Hz, que equivalem a ondas de 8,5 a 11 metros com frequências de 14,3 a 14,6 Hz para o protótipo. As ondas geradas no tanque de ensaios do Centro de tecnologia da UFRJ são ondas quase harmônicas, como pode ser observado nos espectros mostrados nas figuras IV.35, IV.45, IV.55, IV.65.

IV.3.1 - Ondas Inclinadas de 0° com a Direção Surge

Nos ensaios de ondas inclinadas de 0° com a direção surge foram utilizadas ondas com altura média de 50 mm e com período de 0.89 segundos, como pode ser observado na figura IV.35. O desenho do modelo mostrando a direção de incidência da onda, a disposição dos tendões (LC1 a LC4), dos acelerômetros (ACZ1 a ACZ3) e dos eixos coordenados é observada na figura IV.34.

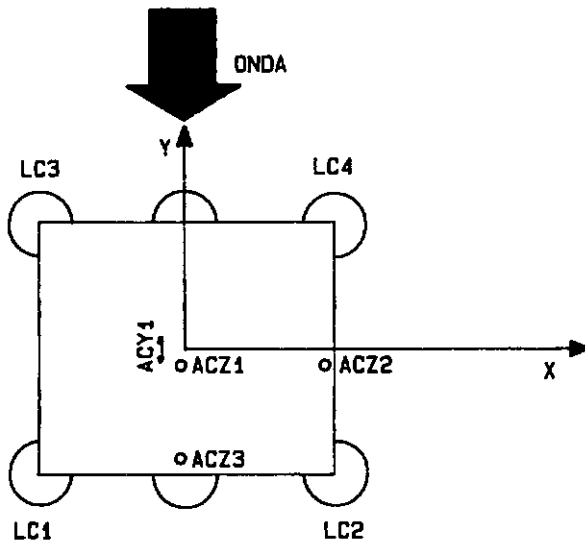


Figura IV.34 - Ensaios sob a ação de ondas a 0° .

As respostas no tempo destes ensaios são mostrados nas figuras IV.36, IV.37 e IV.38. Na figura IV.36 (A) temos a aceleração na direção surge (ACY1), neste caso na direção da onda, enquanto que na figura IV.36 (B) temos a aceleração na direção heave (ACZ1). As figuras IV.37 (A) e (B) mostram as respostas no tempo da variação da força nos tendões 1 e 2 (LC1 e LC2) respectivamente, e as figuras IV.38 (A) e (B) mostram as respostas dos tendões 3 e 4 (LC3 e LC4). Com estes resultados pode se observar um acoplamento da resposta no

tempo com contribuição na frequência de excitação da onda e com outra parcela na frequência associada ao modo pitch.

Na tabela IV.7 é apresentada a variação máxima das forças medidas nos tendões pelos *loadcells* LC1 a LC4, onde pode ser observado que os tendões que recebem as ondas de frente (LC3 e LC4) mostram uma variação da força menor que os outros (LC1 e LC2), devido principalmente à maior variação do empuxo das colunas posteriores (LC1 e LC2) provocada pelo movimento em pitch do modelo.

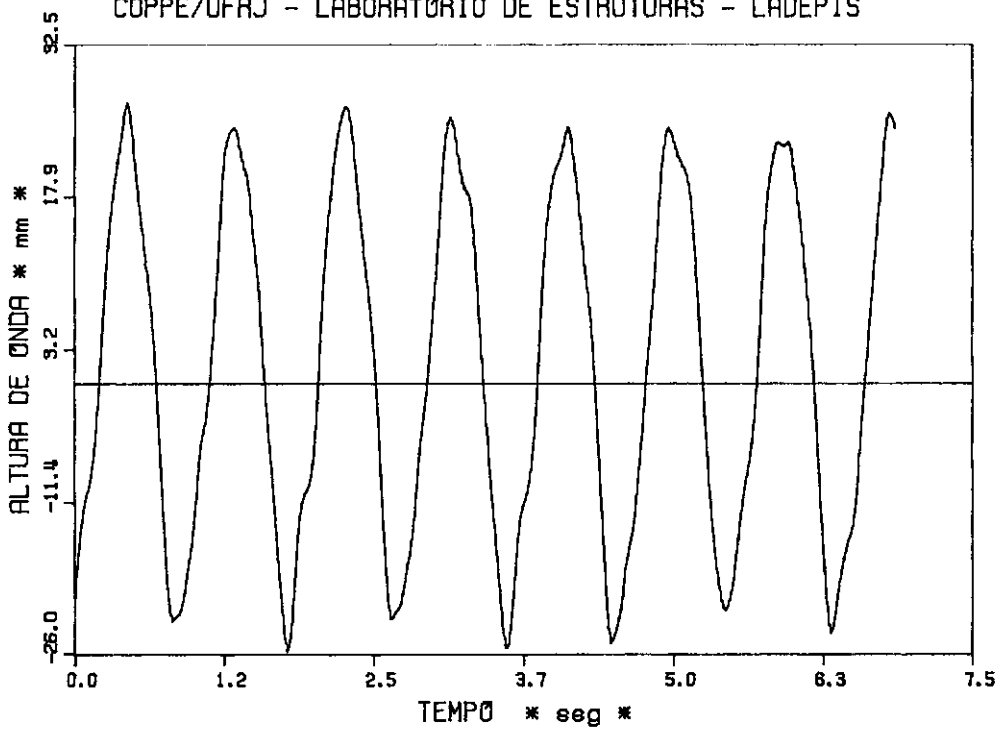
Tabela IV.7 - Variação máxima da força nos tendões para ondas inclinadas de 0° com surge.

	LC1	LC2	LC3	LC4
FORÇA (N)	1,38	1,30	0.75	0.59

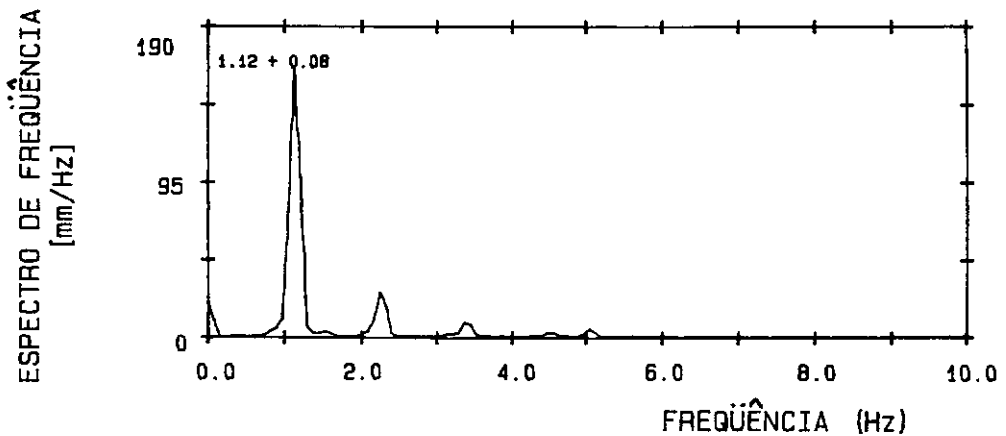
As respostas obtidas no domínio da frequência são mostradas a seguir. Na figura IV.39 observamos os espectros de frequência dos acelerômetros ACZ1 e ACZ3, utilizados para medir a aceleração na direção heave e na direção pitch. Na figura IV.40 observa-se os espectros da aceleração na direção heave (ACZ2) e surge (ACY1). As figuras IV.41 e IV.42 mostram os espectros de frequência para a força nos tendões (LC1 a LC4).

Deve ser observado que o superharmônico da onda em 4,48 Hz entrou em ressonância com o modo pitch, acarretando em uma amplificação dinâmica. Observa-se então que a resposta na frequência associada a pitch se mostra em alguns espectros igual ou maior que a resposta na frequência de excitação da onda (1,12 Hz).

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



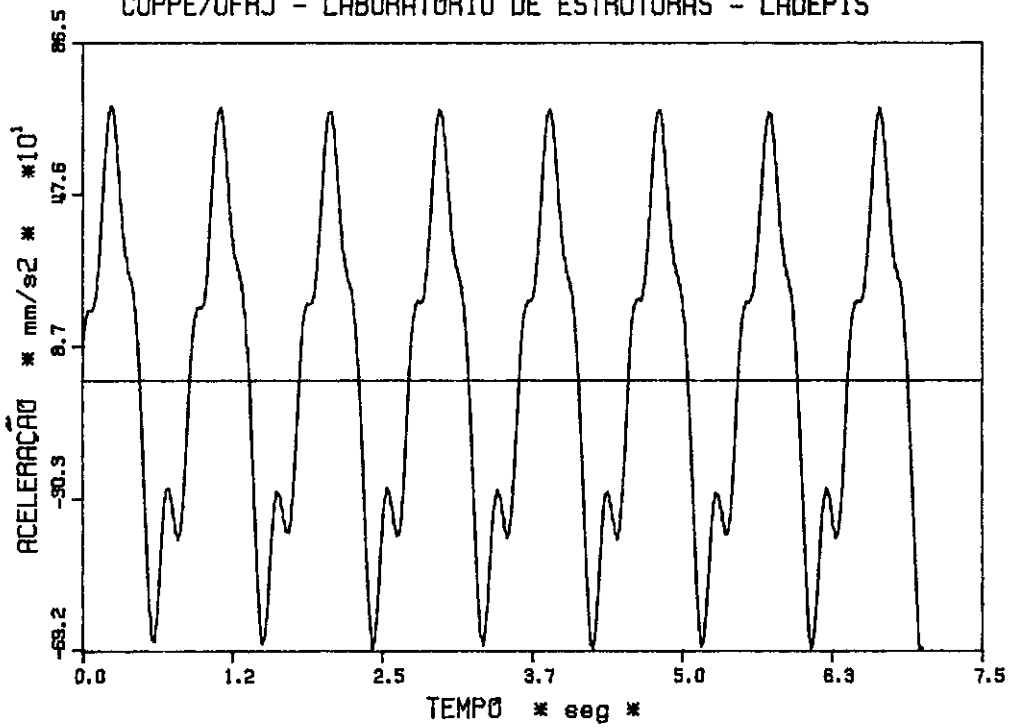
(A) - Altura de onda x tempo



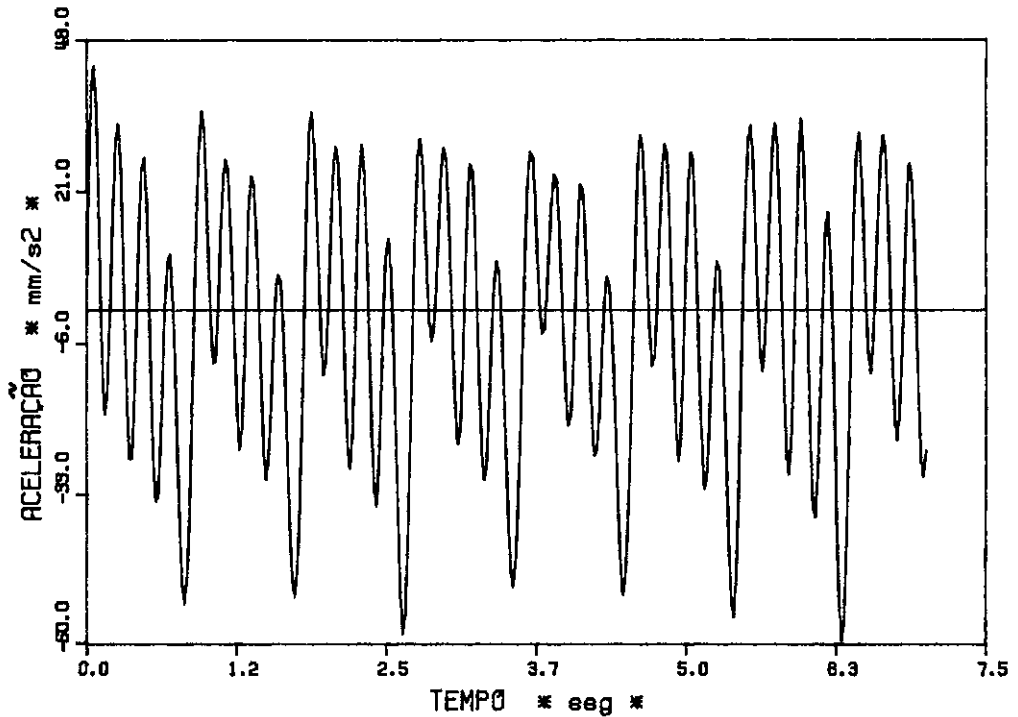
(B) Espectro de frequência da altura de onda

FIGURA IV.35 - Resposta no tempo e espectro de frequência das ondas experimentais inclinadas de 0 graus com a direção surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



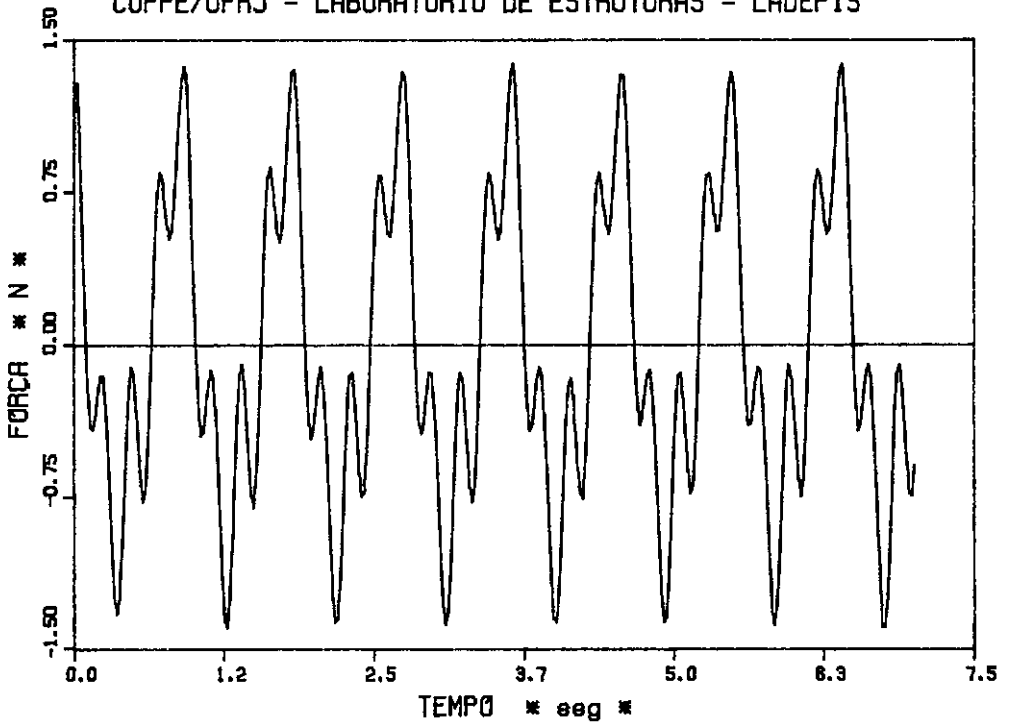
(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge (ACY1)



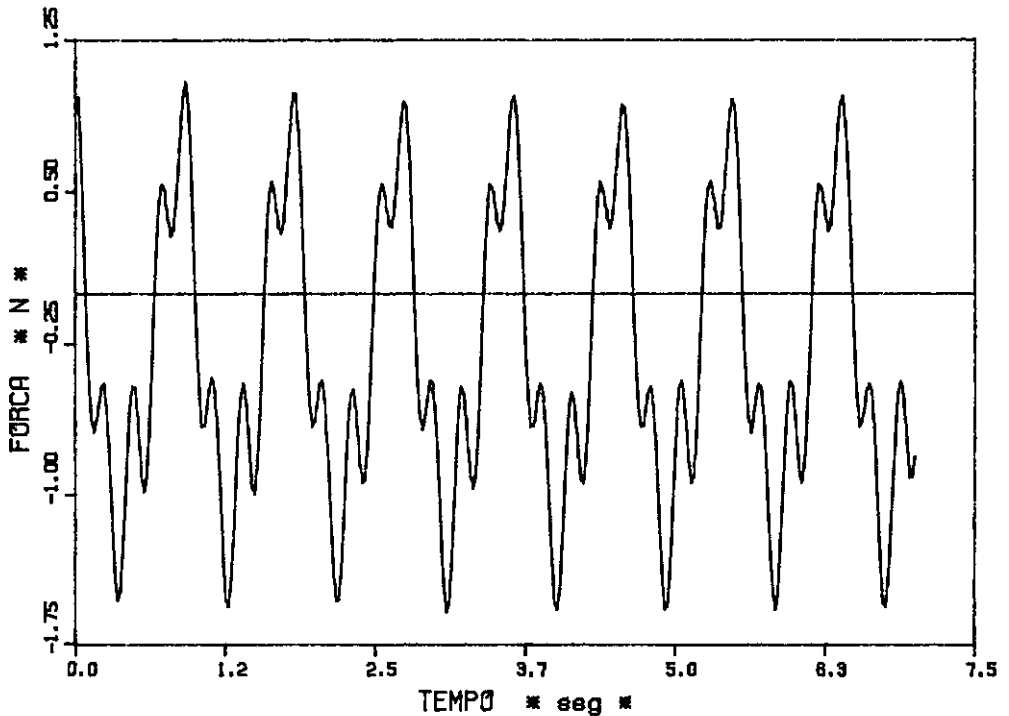
(B) - Resposta no tempo da aceleração na direção heave (ACZ1)

FIGURA IV.36 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 0 graus com a direção surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



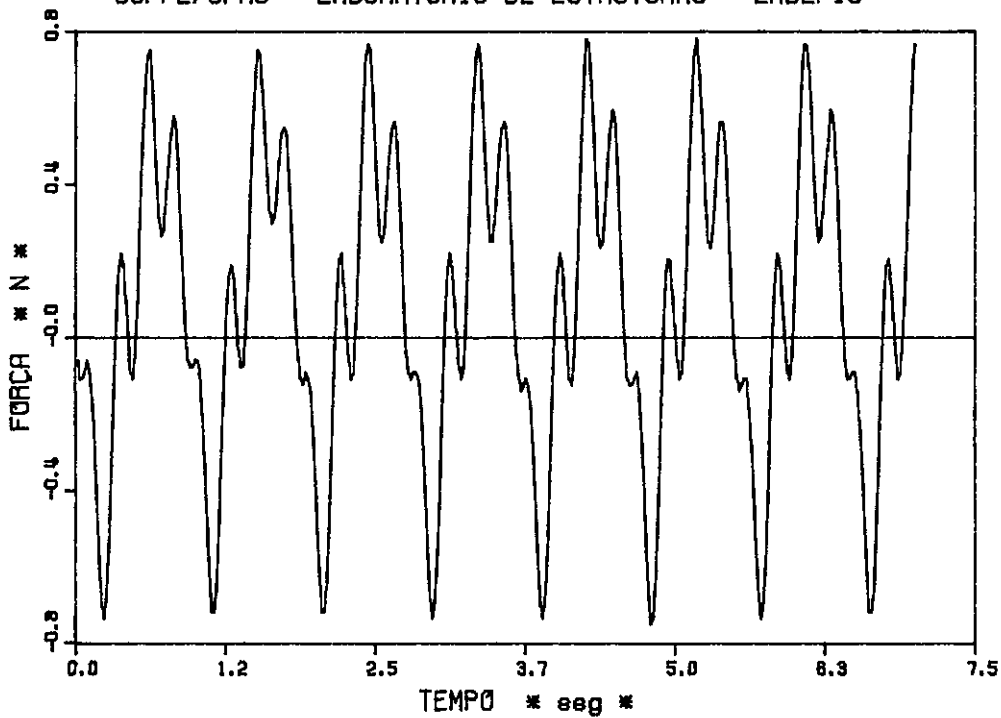
(A) - Resposta no tempo da variação de força no tendão 1



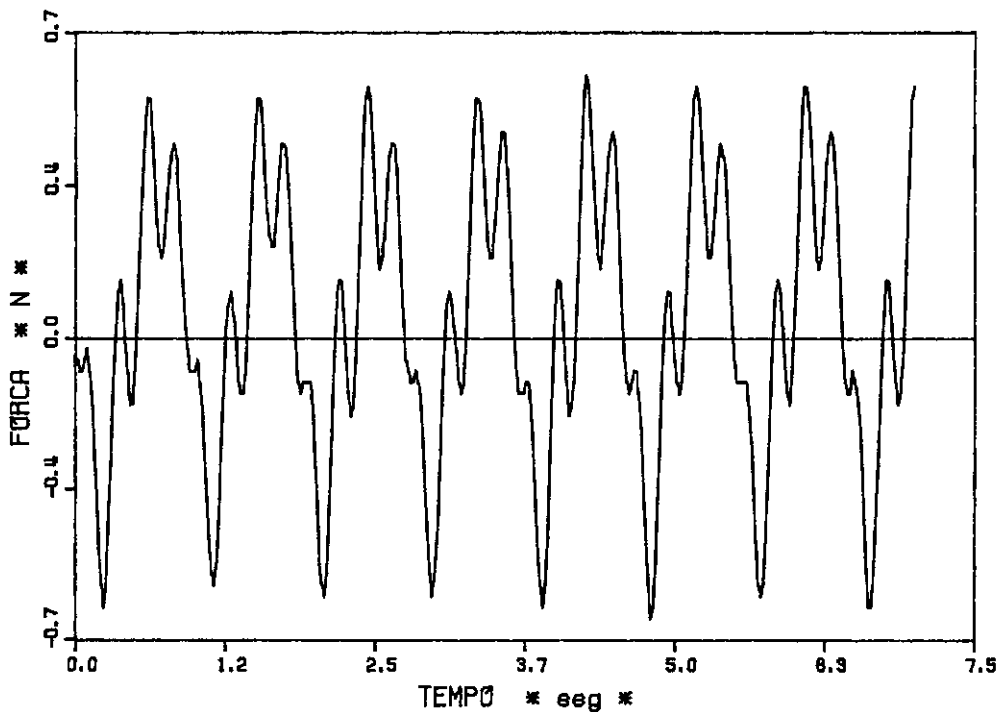
(B) - Resposta no tempo da variação de força no tendão 2

FIGURA IV.37 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 0 graus com a direção surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 3



(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 4

FIGURA IV.38 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 0 graus com a direção surge.

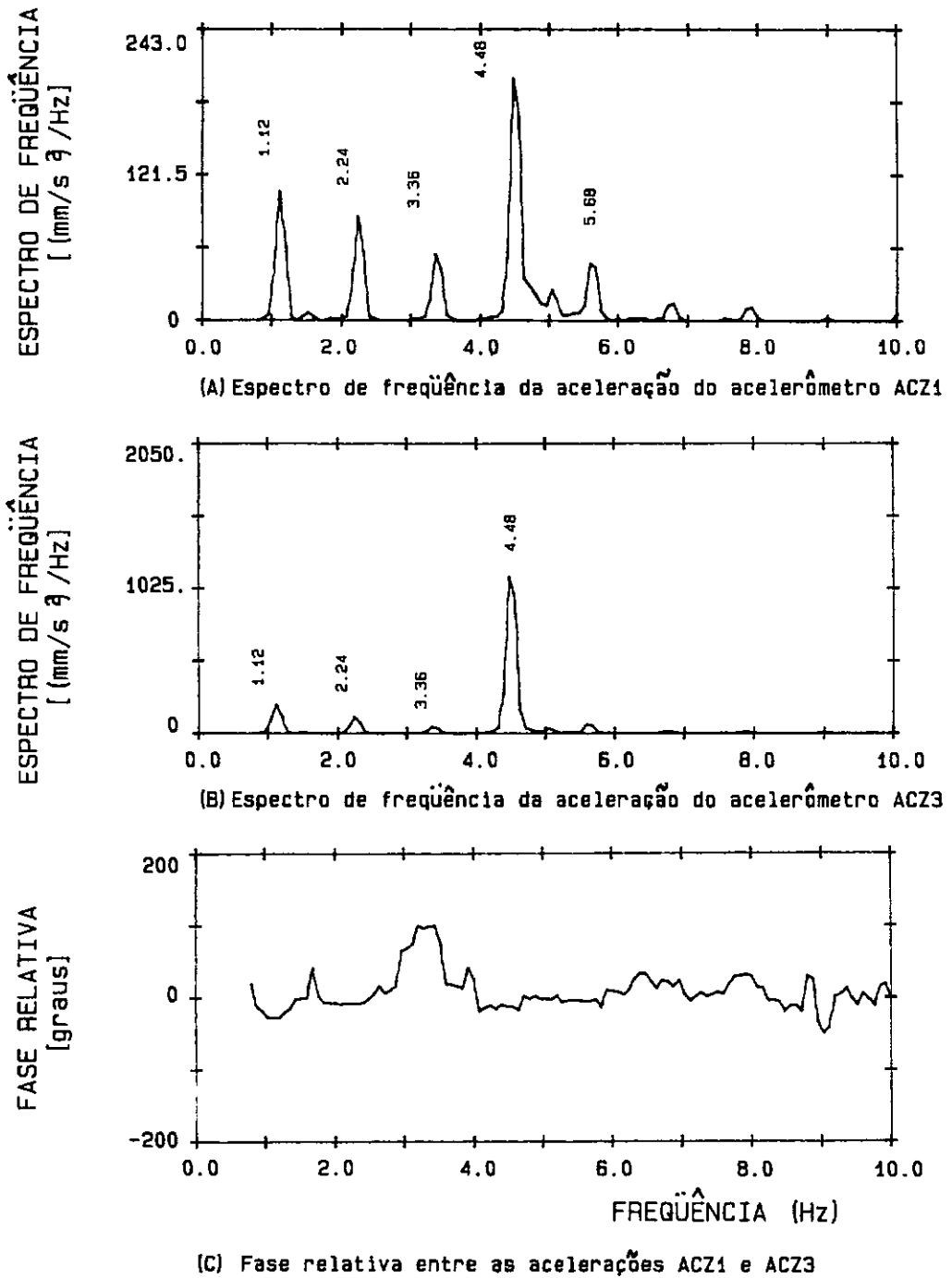
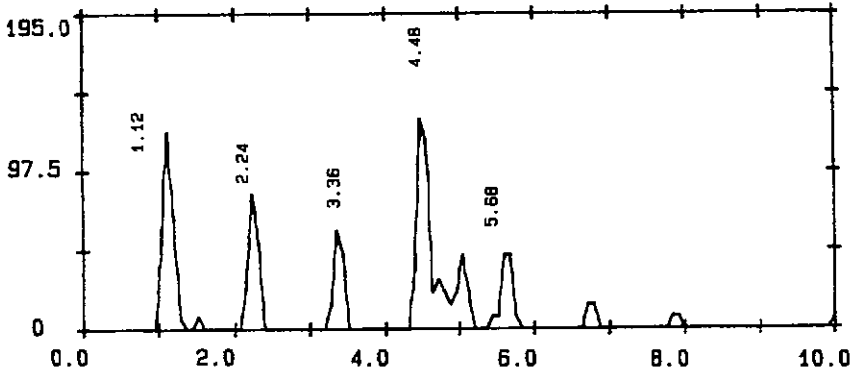


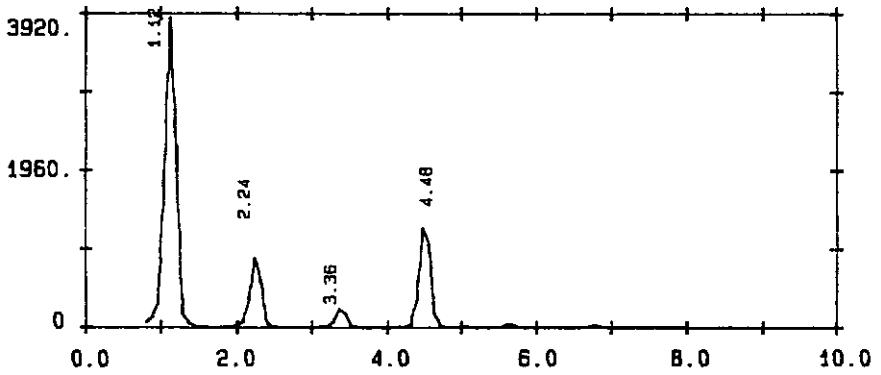
FIGURA IV.39 - Espectros de frequência da aceleração do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 0 graus com a direção surge.

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s² / Hz)]



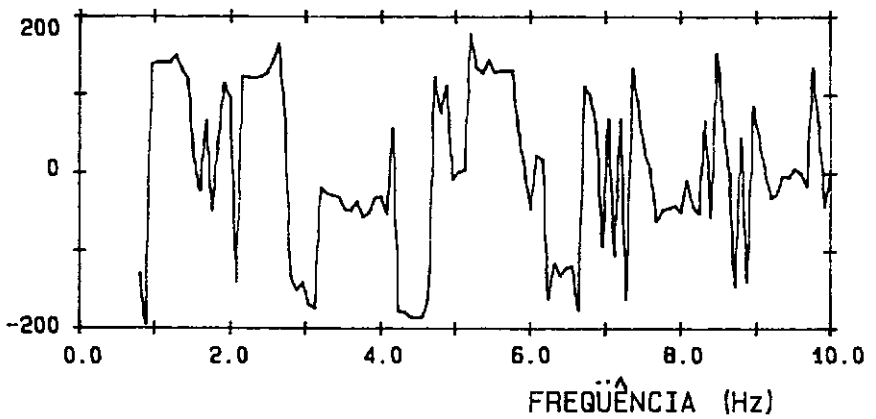
(A) Espectro de frequência da aceleração do acelerômetro ACZ2

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s² / Hz)]



(B) Espectro de frequência da aceleração do acelerômetro ACY1

FASE RELATIVA
[graus]



(C) Fase relativa entre as acelerações ACZ2 e ACY1

FIGURA IV.40 - Espectros de frequência da aceleração do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 0 graus com a direção surge.

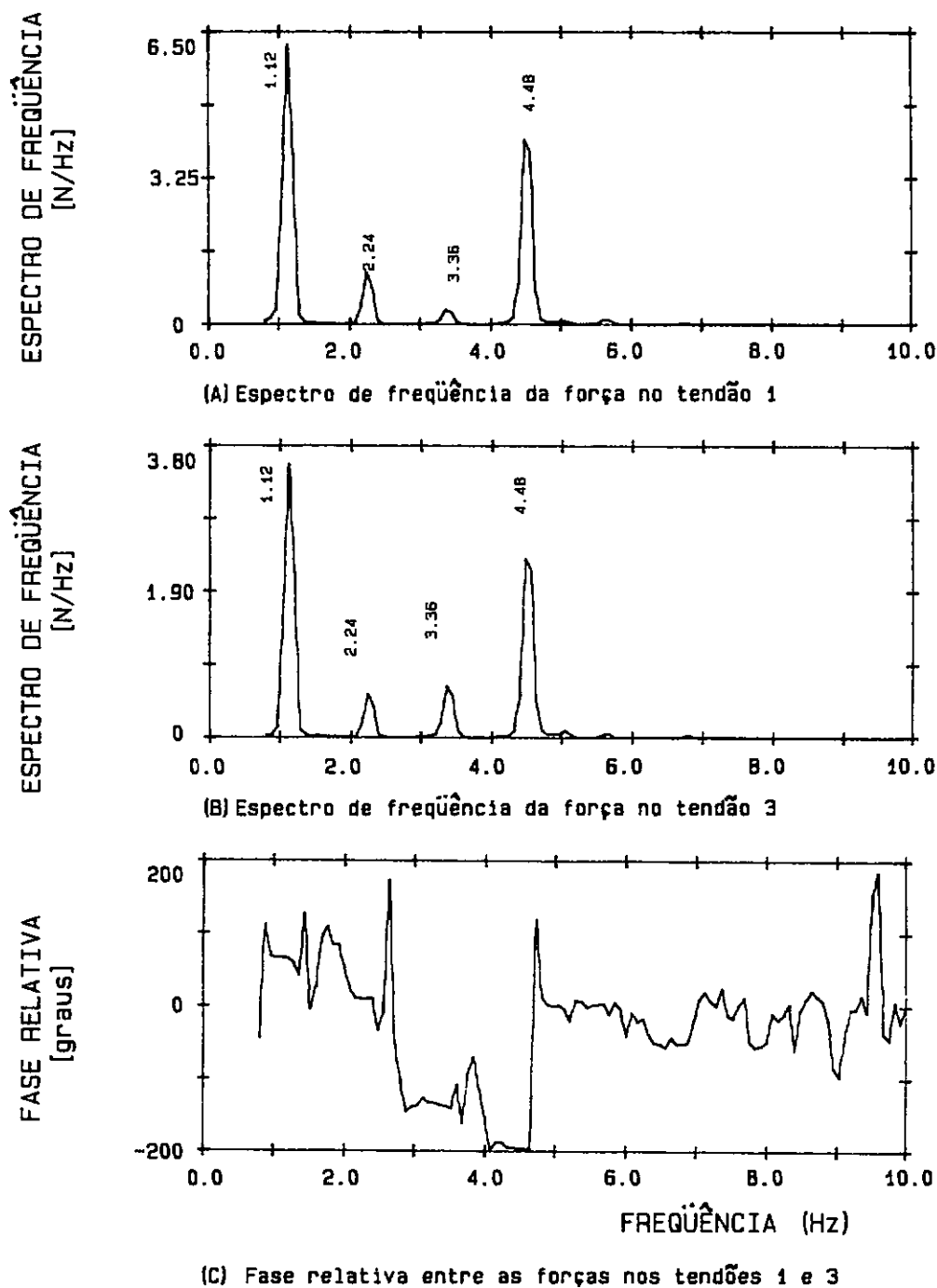


FIGURA IV.41 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 0 graus com a direção surge.

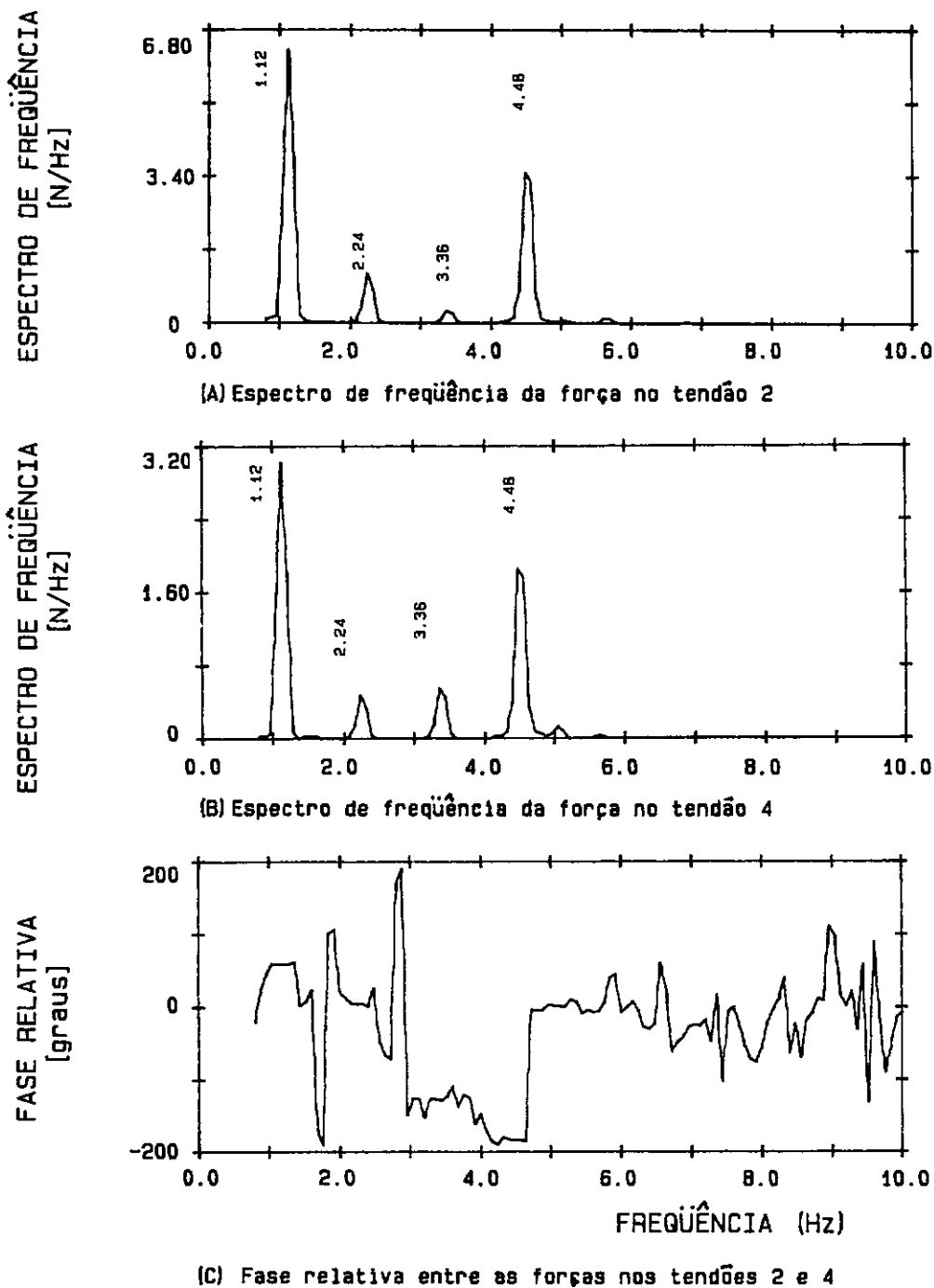


FIGURA IV.42 - Espectros de freqüência da força nos tendões do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 0 graus com a direção surge.

IV.3.2 - Ondas Inclinadas de 30° com a Direção Surge

O desenho da figura IV.43 ilustra a série de ensaios com ondas incidindo em 30° com a direção surge. A foto da figura IV.44 mostra o modelo no tanque de ondas da COPPE, quando da realização destes ensaios. As ondas quase harmônicas utilizadas tinham altura de 60 mm e período de 0,89 segundos, conforme a figura IV.45.

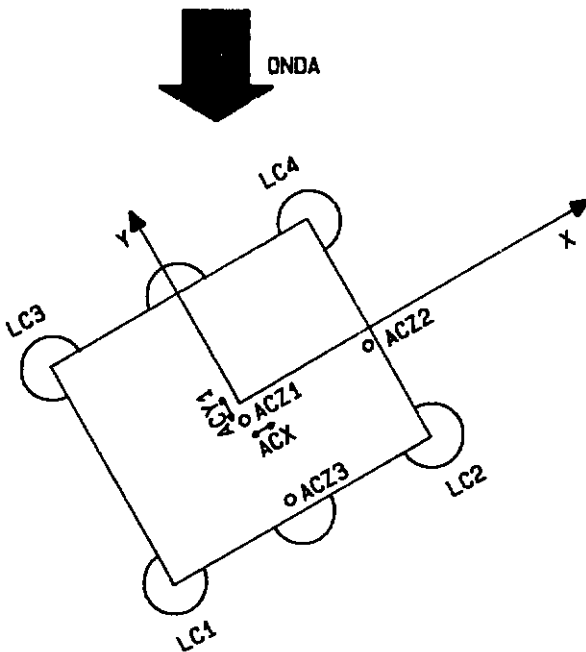


Figura IV.43 - Ensaio sob a ação de ondas a 30° .

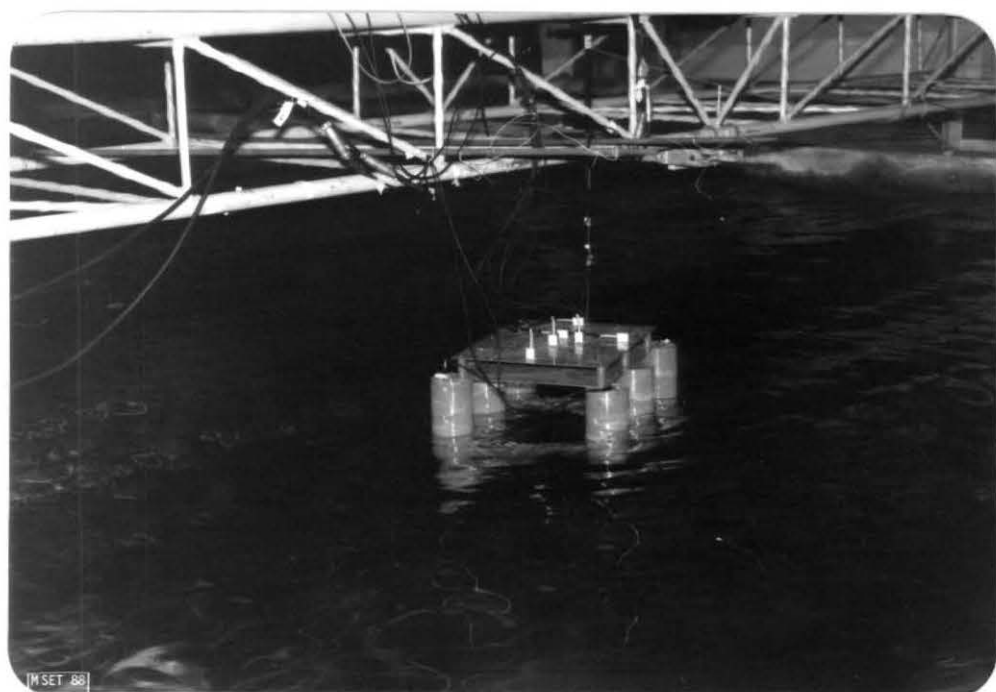


Figura IV.44 - Foto dos ensaios sob a ação de ondas a 30° .

Os resultados da resposta no tempo dos ensaios são apresentados nas figuras a seguir. A figura IV.46 (A) mostra a aceleração na direção sway, a figura IV.46 (B) mostra a aceleração na direção surge e a figura IV.46(C) mostra a aceleração na direção heave. As figuras IV.47 (A) e (B) mostram as respostas no tempo da variação da força nos tendões 1 e 2 (LC1 e LC2) respectivamente, e as figuras IV.48 (A) e (B) mostram as respostas dos tendões 3 e 4 (LC3 e LC4). A tabela IV.8 mostra a variação máxima das forças nos tendões, onde pode ser observado que o tendão LC1 apresenta a maior variação de força, novamente devido à variação do empuxo, que é maior neste tendão e no tendão LC2 devido ao movimento em pitch. Com estas respostas no tempo é possível verificar que ocorreu

uma redução no acoplamento devido a pitch, em relação ao ensaio sob ondas a 0° .

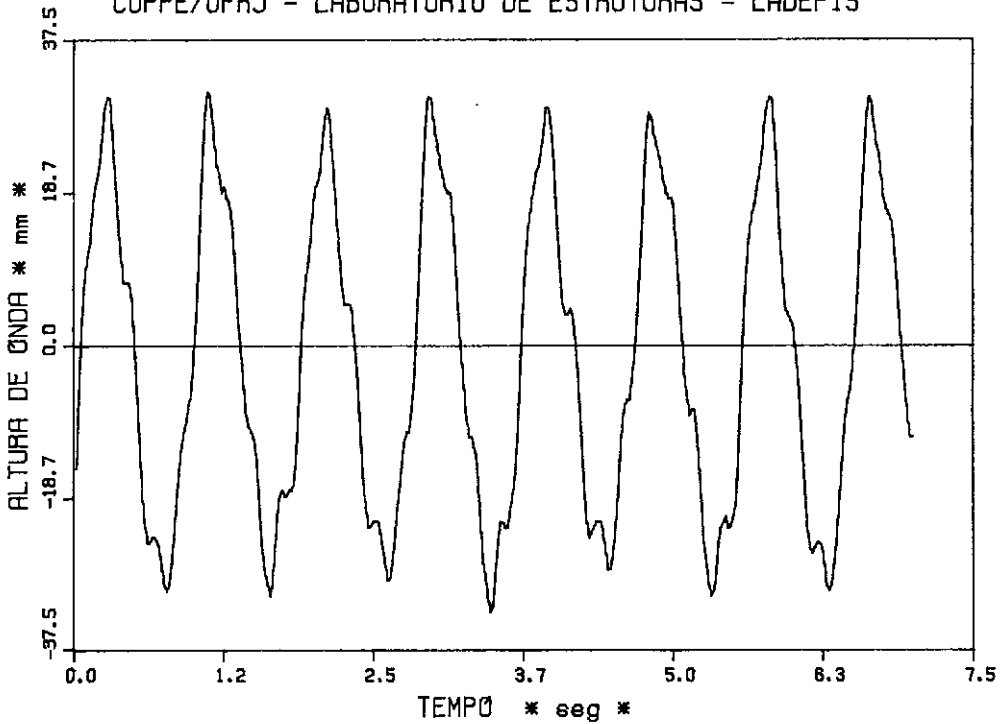
Tabela IV.8 - Variação máxima da força nos tendões para ondas inclinadas de 30° com surge.

	LC1	LC2	LC3	LC4
FORÇA (N)	1,39	0,94	0,56	0,58

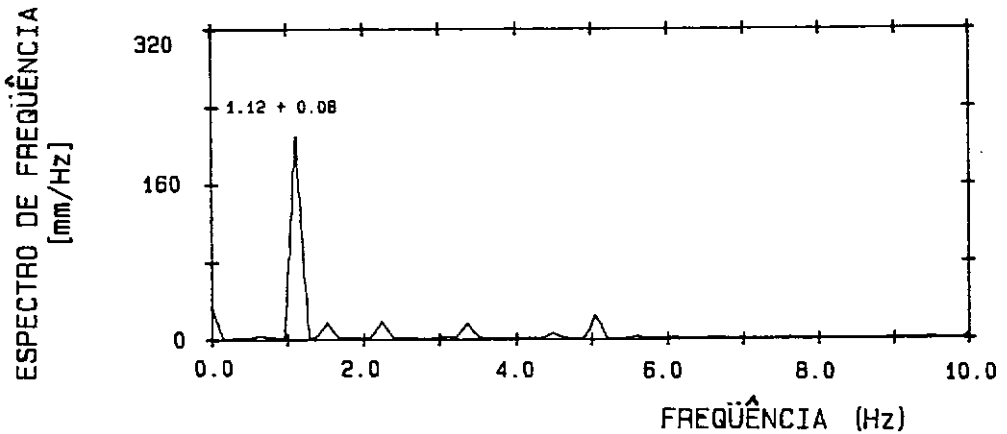
As respostas obtidas no domínio da frequência são mostradas a seguir. Na figura IV.49 observamos os espectros de frequência dos acelerômetros ACZ1 e ACZ3, utilizados para medir a aceleração na direção heave e na direção pitch. Na figura IV.50 observa-se os espectros da aceleração na direção heave (ACZ2) e surge (ACY1). As figuras IV.51 e IV.52 mostram os espectros de frequência para a variação da força nos tendões (LC1 a LC4).

Analisando estes espectros é possível dizer que houve uma redução significativa da influência de pitch na frequência superharmônica 4,48 Hz do modelo. Por isso concluímos que o acoplamento em pitch apresentado foi realmente menor que o do ensaio sob ondas a 0° .

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



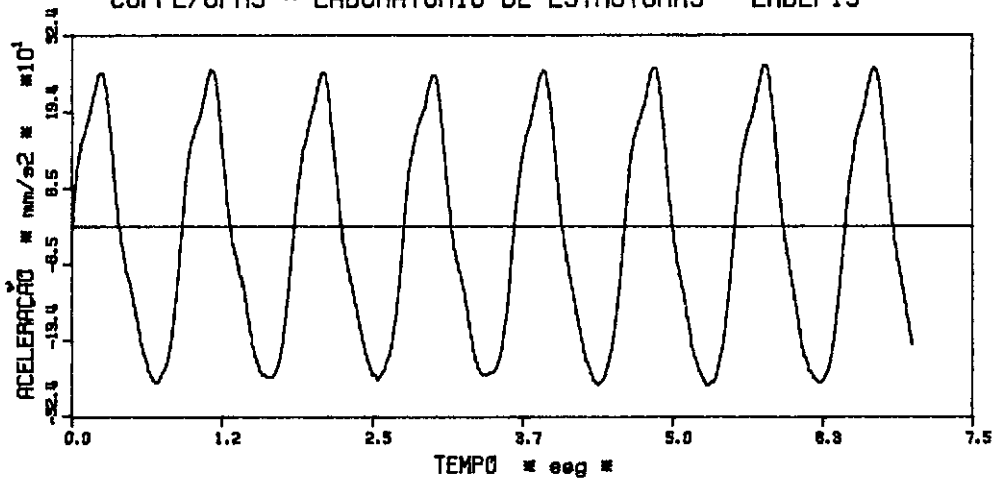
(A) - Altura de onda x tempo



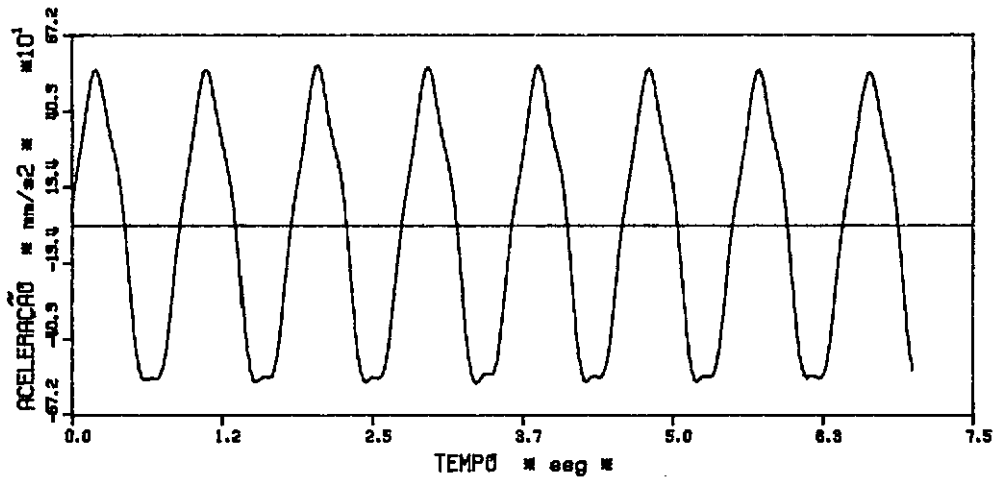
(B) Espectro de frequência da altura de onda

FIGURA IV.45 - Resposta no tempo e espectro de frequência das ondas experimentais inclinadas de 30 graus com a direção surge.

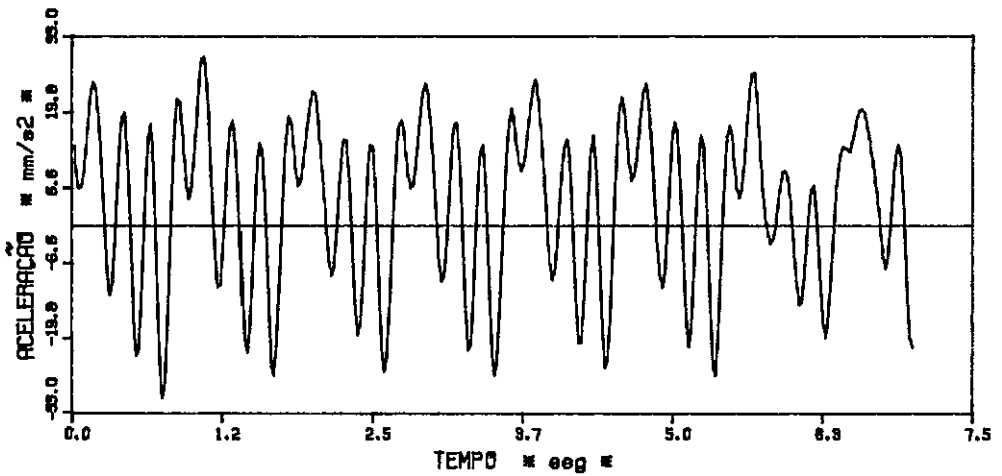
COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção sway (ACX)



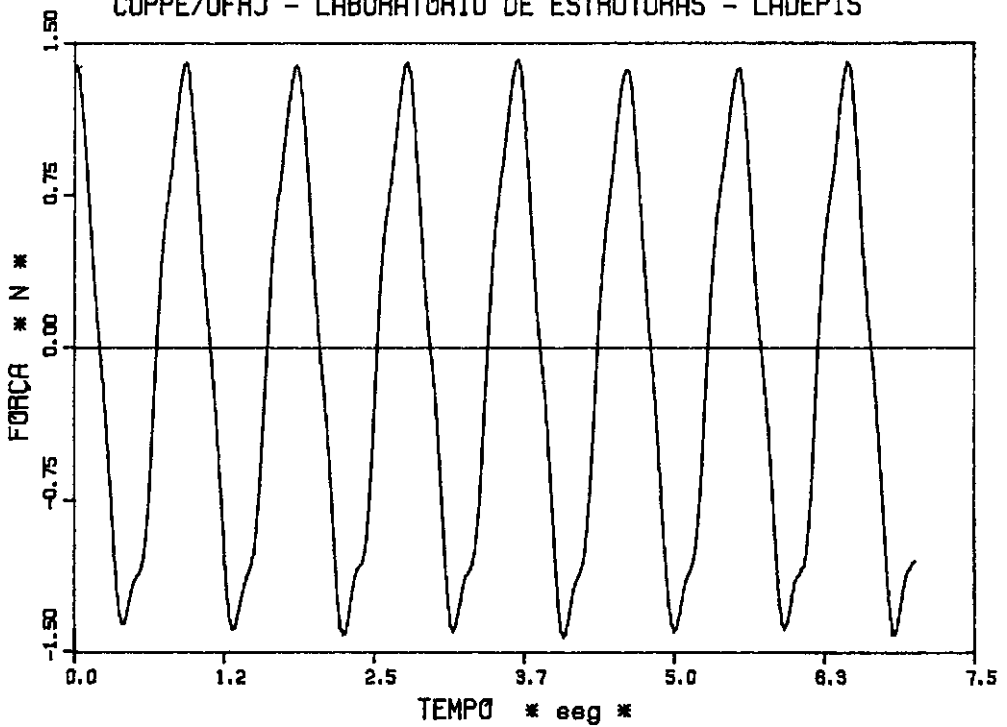
(B) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge (ACY1)



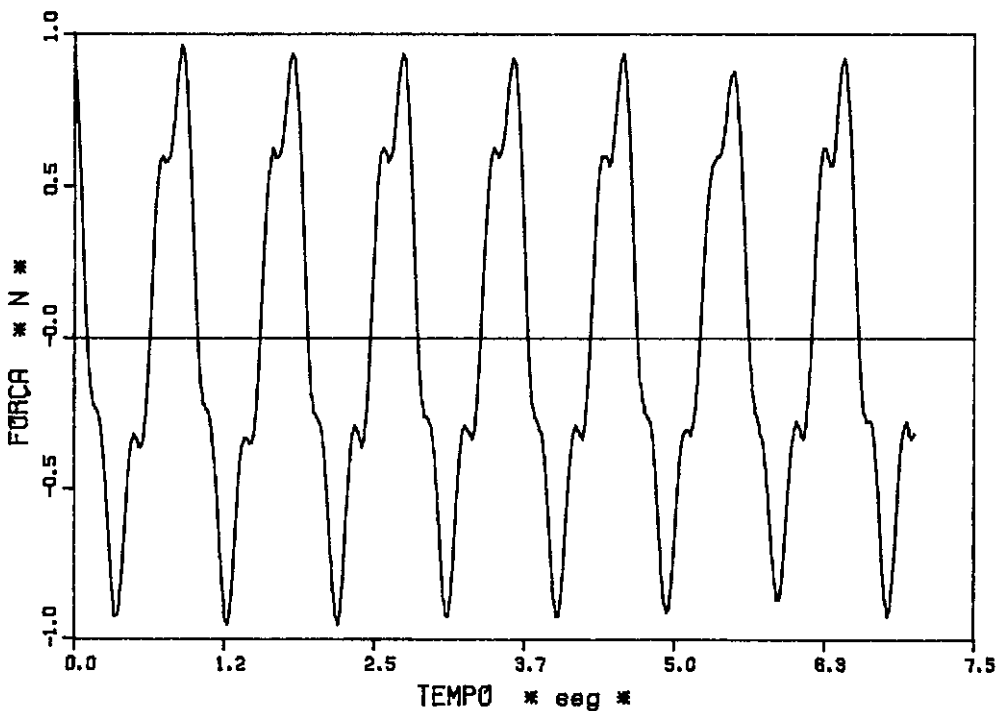
(C) - Resposta no tempo da aceleração na direção heave (ACZ1)

FIGURA IV.46 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 30 graus com a direção surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



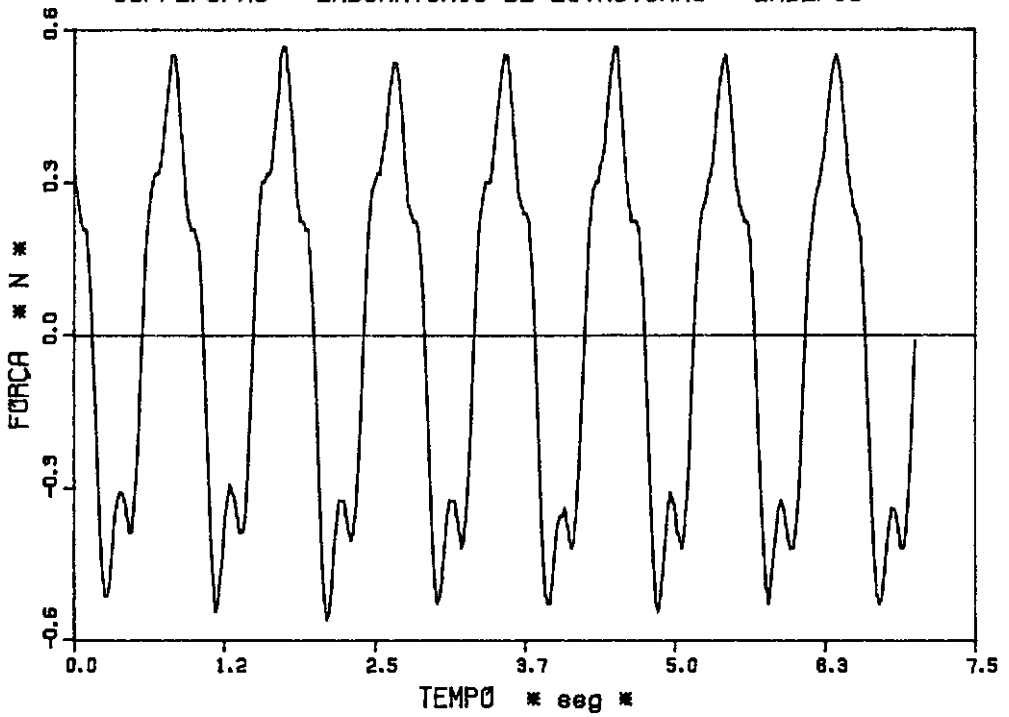
(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1



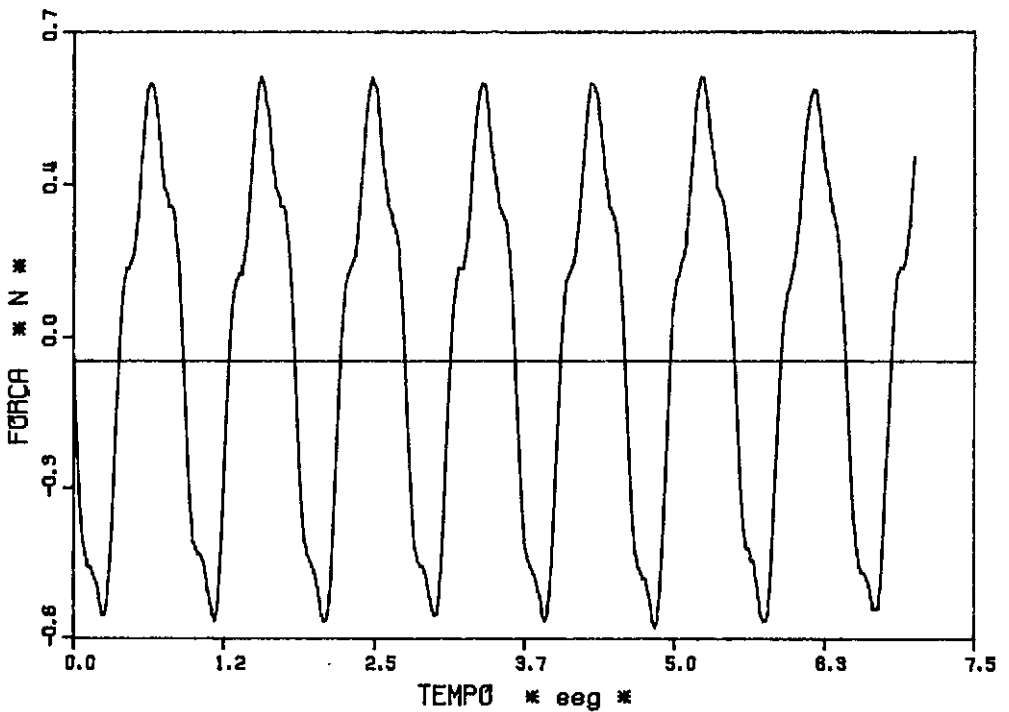
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA IV.47 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 30 graus com a direção surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



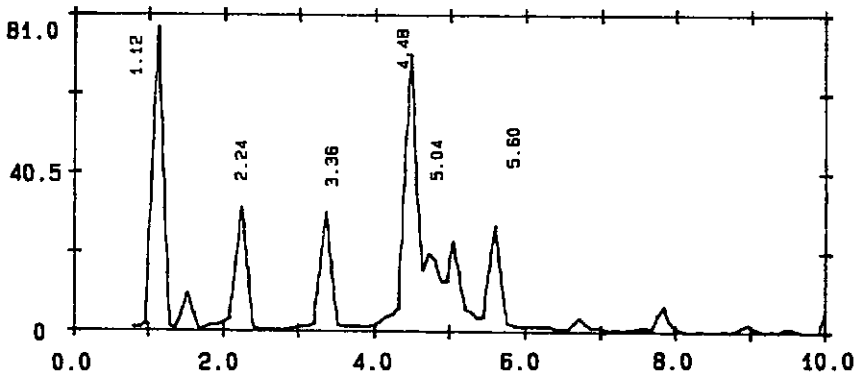
(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 3



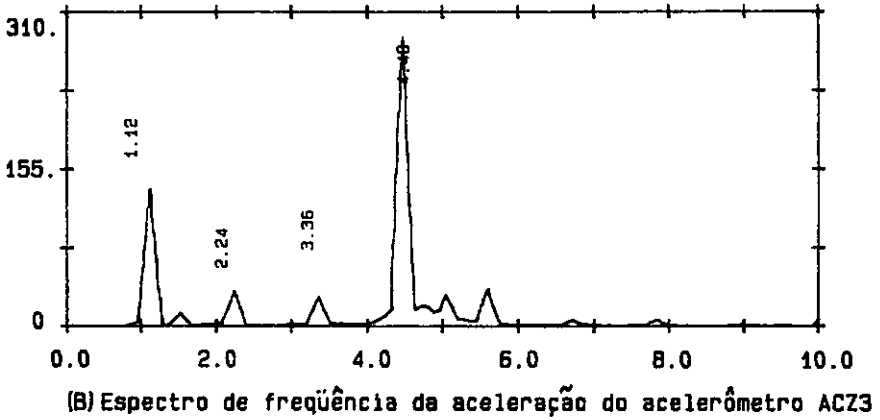
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 4

FIGURA IV.48 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 30 graus com a direção surge.

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s²/Hz)]



ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s²/Hz)]



FASE RELATIVA
[graus]

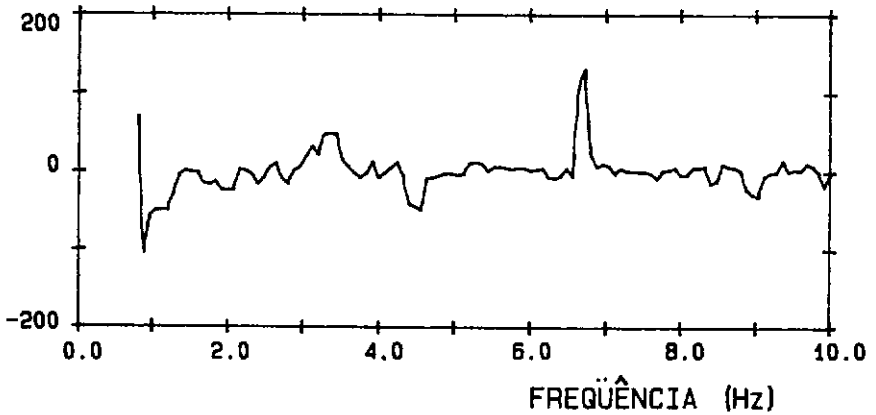
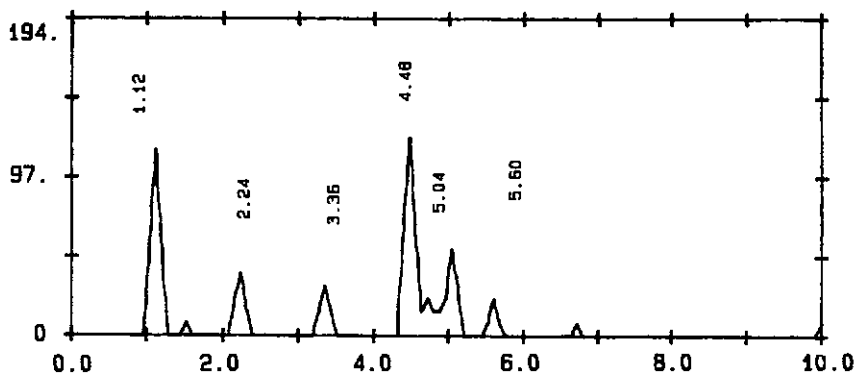


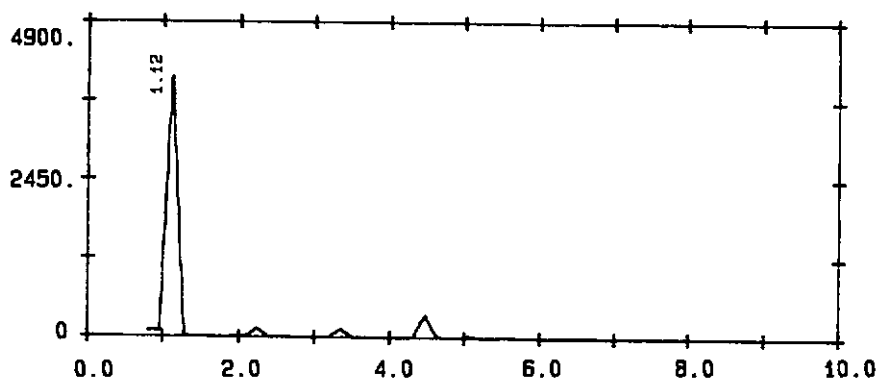
FIGURA IV.49 - Espectros de frequência da aceleração do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 30 graus com a direção surge.

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[mm/s²/Hz]



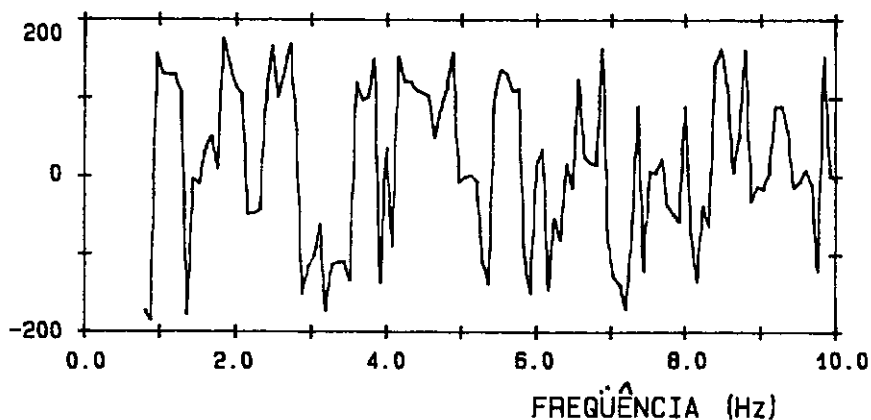
(A) Espectro de frequência da aceleração do acelerômetro ACZ2

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[mm/s²/Hz]



(B) Espectro de frequência da aceleração do acelerômetro ACY1

FASE RELATIVA
[graus]



(C) Fase relativa entre as acelerações ACZ2 e ACY1

FIGURA IV.50 - Espectros de frequência da aceleração do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 30 graus com a direção surge.

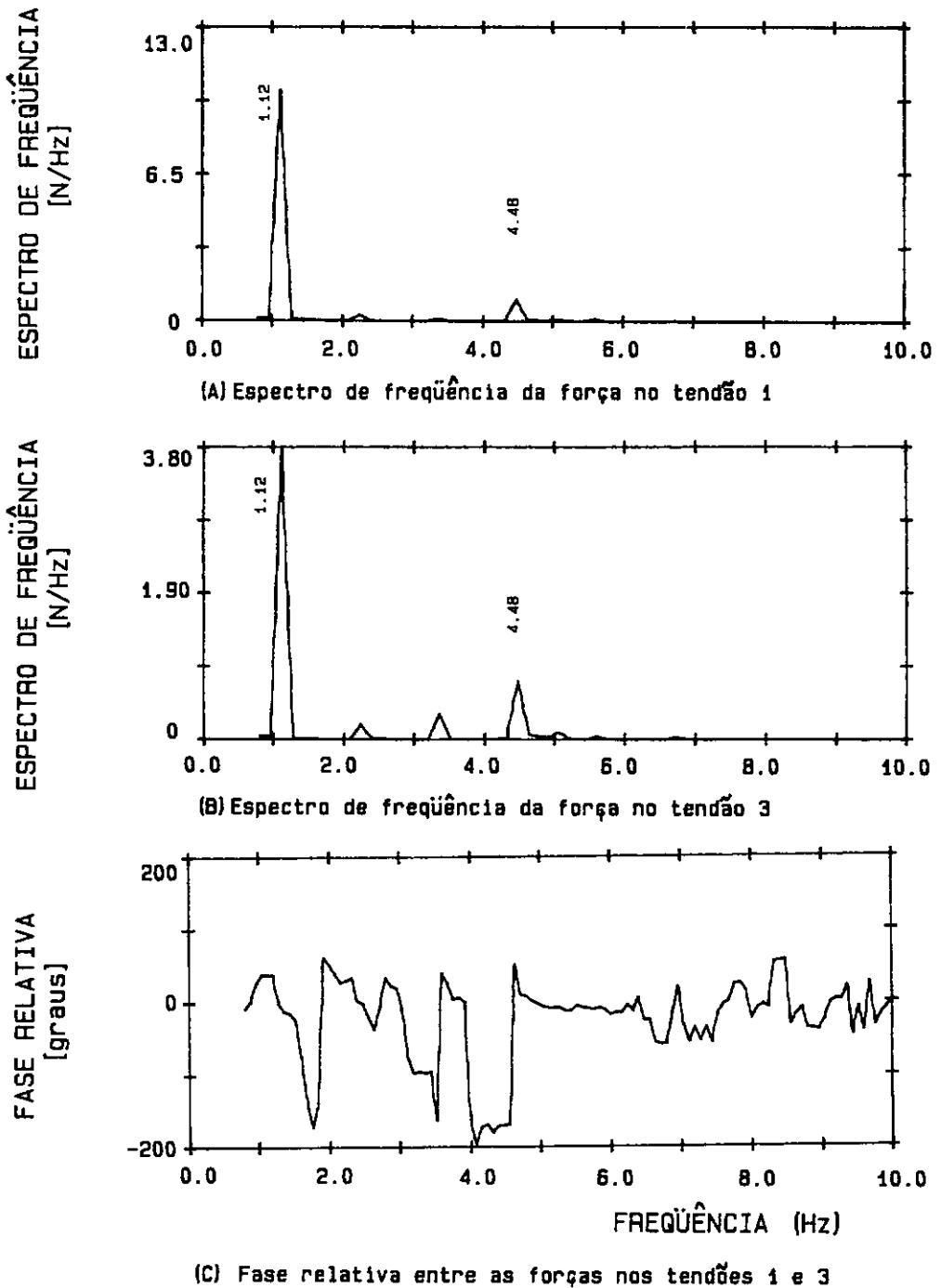


FIGURA IV.51 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 30 graus com a direção surge.

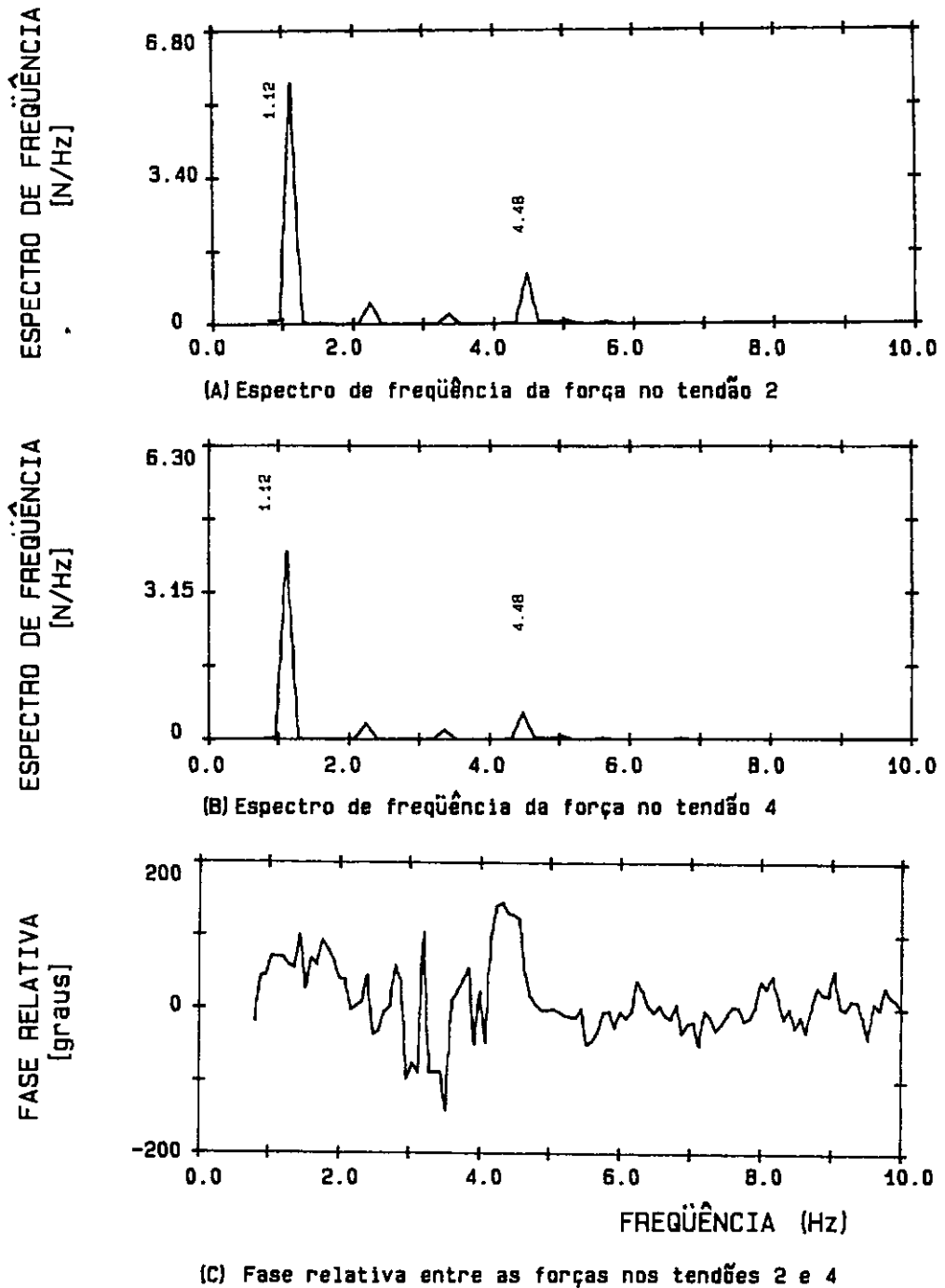


FIGURA IV.52 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 30 graus com a direção surge.

IV.3.3 - Ondas Inclinadas de 60° com a Direção Surge

Os ensaios sob a ação de ondas inclinadas de 60° com a direção surge são apresentados neste item e são ilustrados na figura IV.53 e na figura IV.54, onde temos uma vista geral do ensaio no tanque de ondas. As ondas utilizadas nestes ensaios apresentaram altura média de 60 mm e período igual a 0.89 segundos, conforme pode ser observado na figura IV.55.

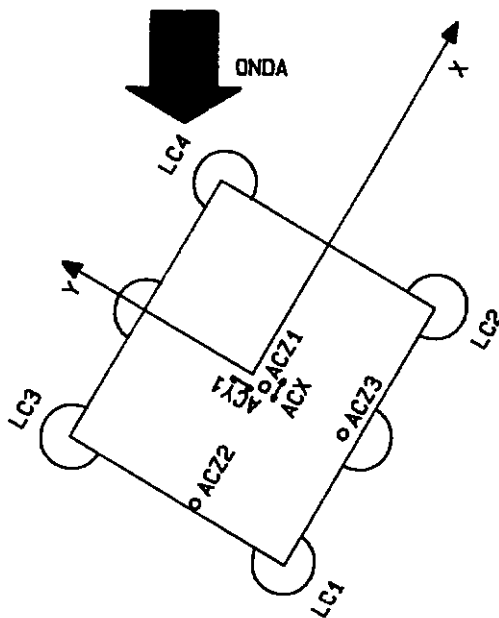


Figura IV.53 - Ensaio sob a ação de ondas a 60° .



Figura IV.54 - Foto dos ensaios sob ação de ondas a 60° .

As figuras IV.56, IV.57 e IV.58 mostram as respostas no tempo para estes ensaios. Na figura IV.56 (A) pode ser observada a aceleração na direção sway, enquanto que na figura IV.56 (B) temos a aceleração na direção surge e na figura IV.56 (C), a aceleração na direção heave. As figuras IV.57 e IV.58 mostram as respostas no tempo da variação das forças nos tendões (LC1 a LC4). A variação máxima das forças nos tendões está na tabela IV.9, onde pode ser observado que o tendão LC1 continua sendo o que apresenta a maior variação da força, devido também à variação do empuxo.

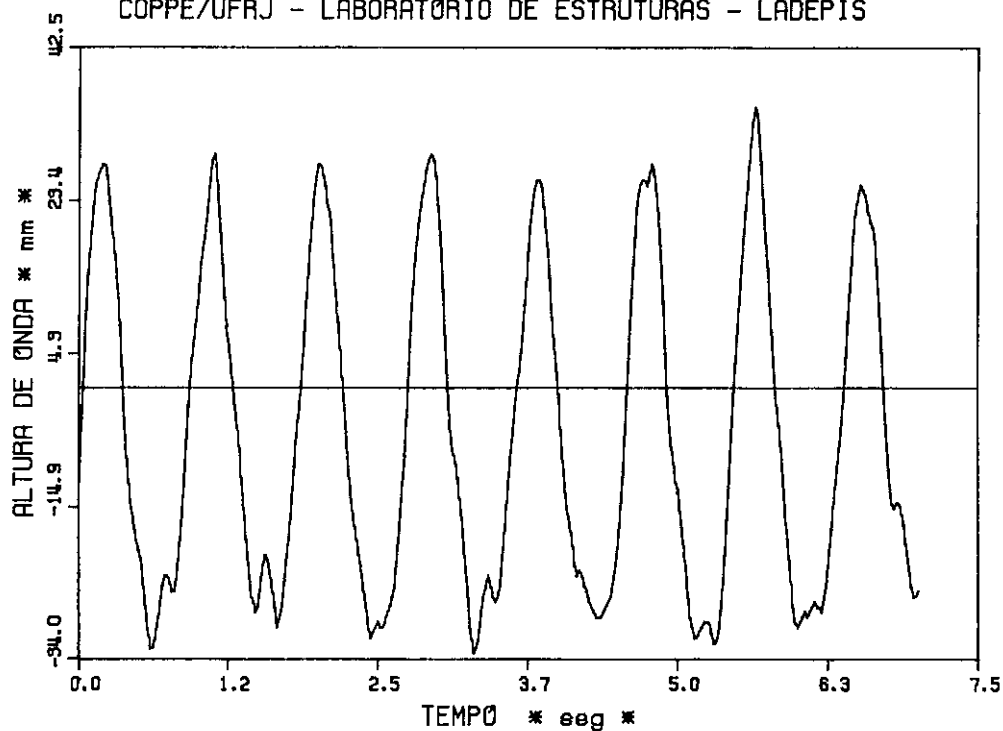
Tabela IV.9 - Variação máxima da força nos tendões para ondas inclinadas de 60° com surge.

	LC1	LC2	LC3	LC4
FORÇA (N)	1,35	0,68	0,80	0,81

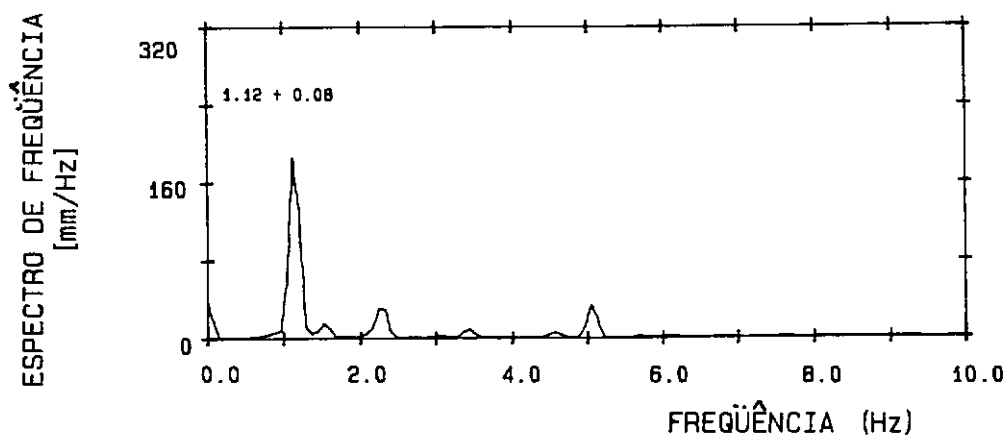
São apresentadas a seguir as respostas no domínio da frequência, começando pela figura IV.59, onde temos as respostas dos acelerômetros na direção heave ACZ1 e ACZ3. Na figura IV.60 são apresentados os espectros de frequência dos acelerômetros na direção heave ACZ2 e da direção surge ACY1. Nas figuras IV.61 e IV.62 são mostrados os espectros da força nos tendões LC1 a LC4.

Observando os espectros de frequência obtidos para os acelerômetros na direção heave, podemos dizer que, por terem todos praticamente a mesma intensidade, foi excitado principalmente o modo heave, e não o modo pitch como estava acontecendo nos ensaios com ondas a 0° e 30°. É observada também uma amplificação na frequência do superharmônico 4,48 Hz nos tendões LC2 e LC4, conforme pode ser confirmado pela resposta no tempo das figuras IV.57 e IV.58.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



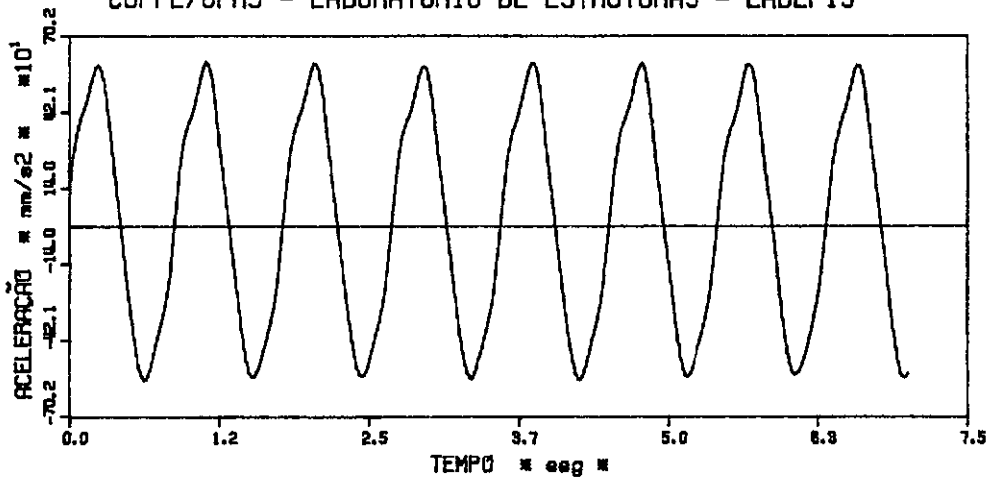
(A) - Altura de onda x tempo



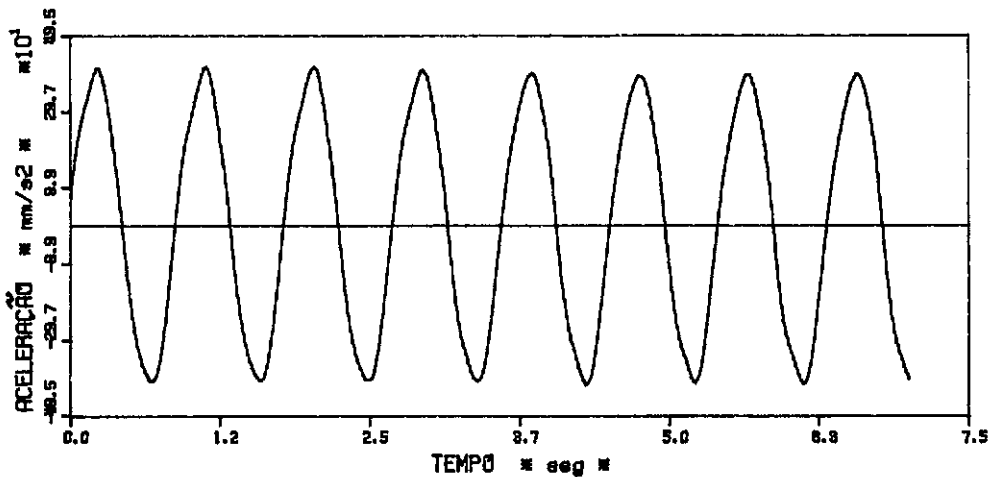
(B) Espectro de frequência da altura de onda

FIGURA IV.55 - Resposta no tempo e espectro de frequência das ondas experimentais inclinadas de 60 graus com a direção surge.

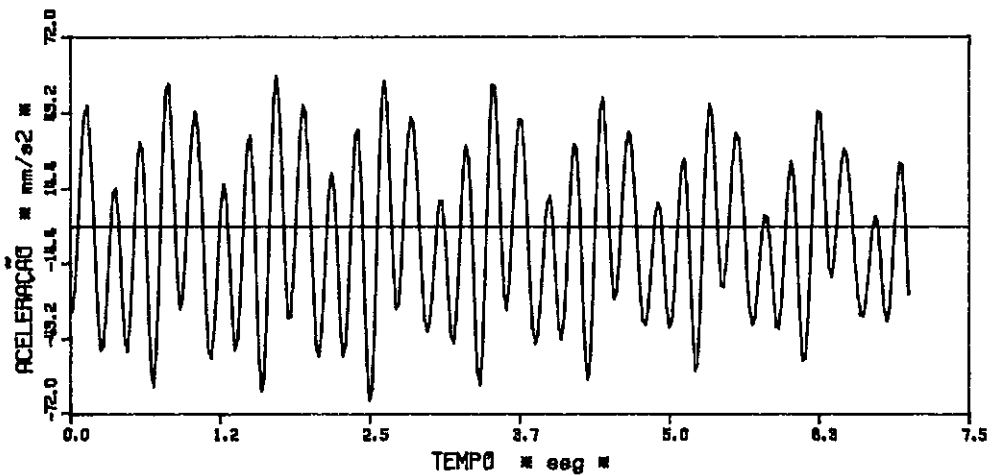
COPPE/UFAJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção sway (ACX)



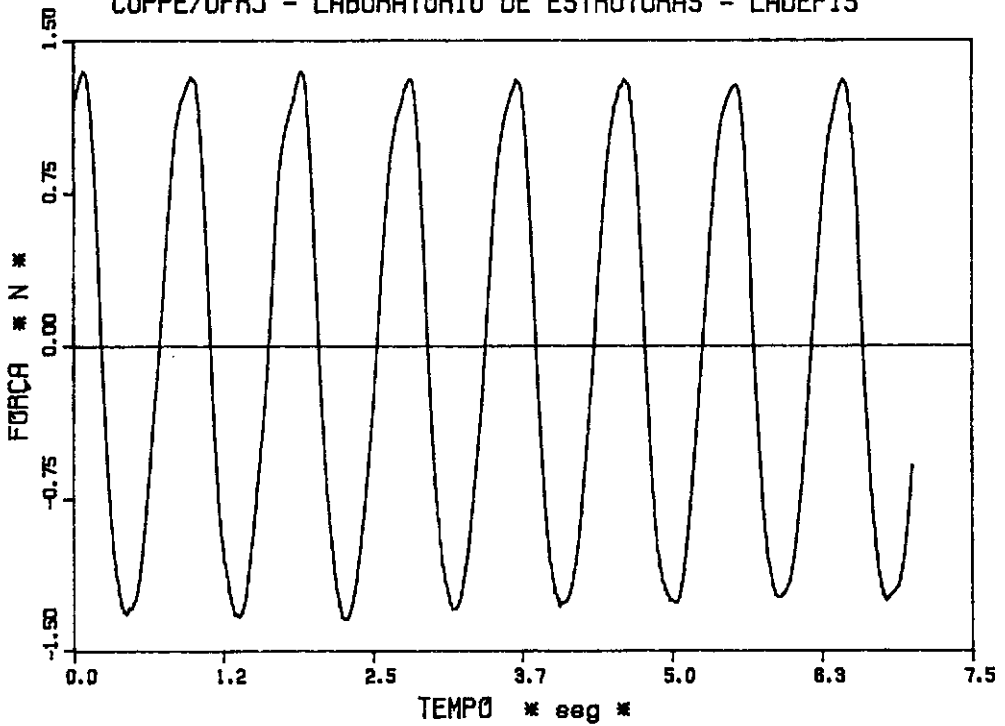
(B) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge (ACY1)



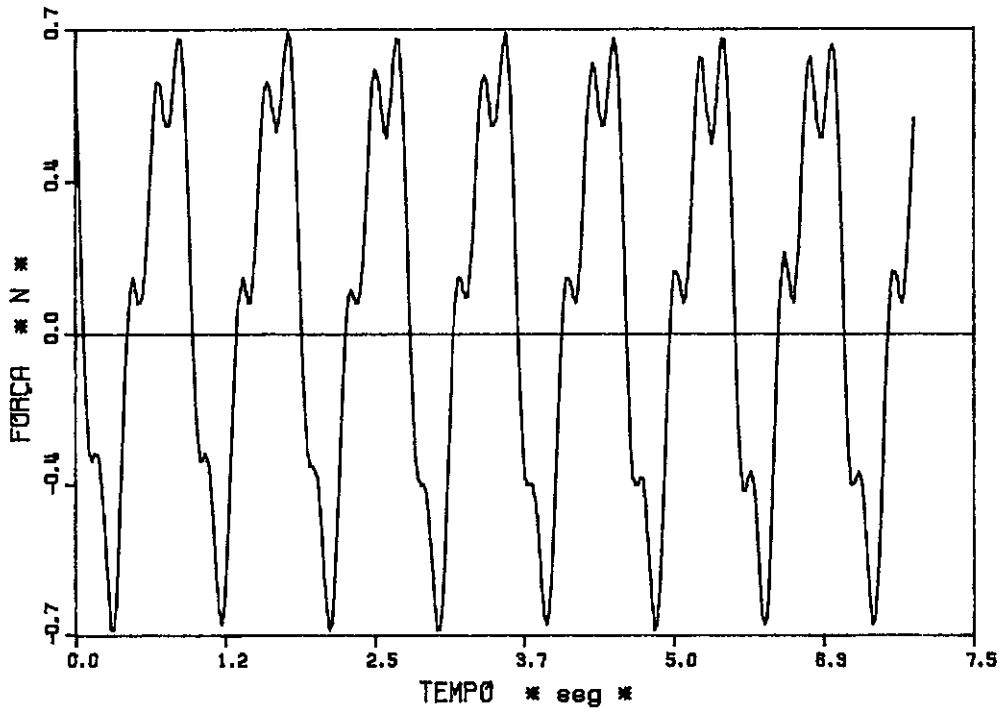
(C) - Resposta no tempo da aceleração na direção heave (ACZ1)

FIGURA IV.56 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 60 graus com a direção surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



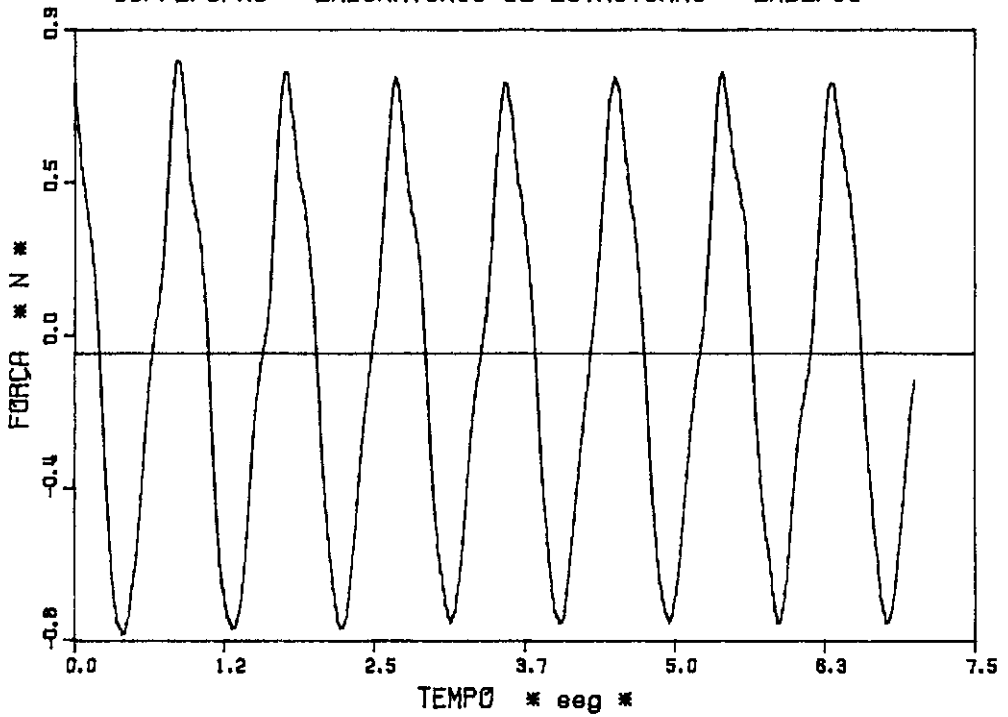
(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1



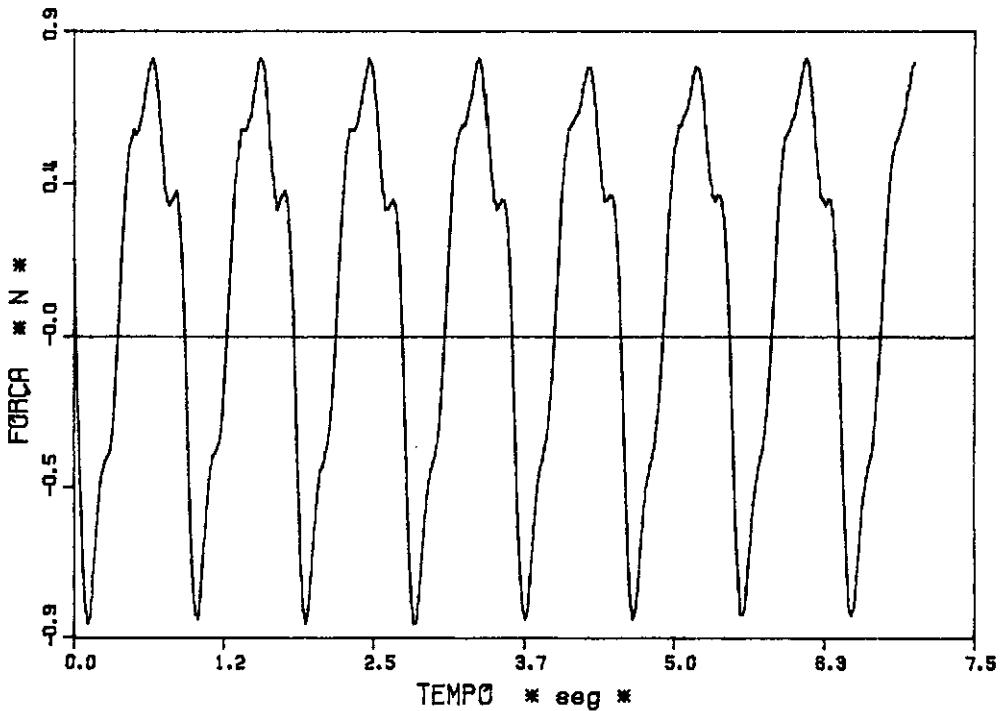
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA IV.57 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 60 graus com a direção surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



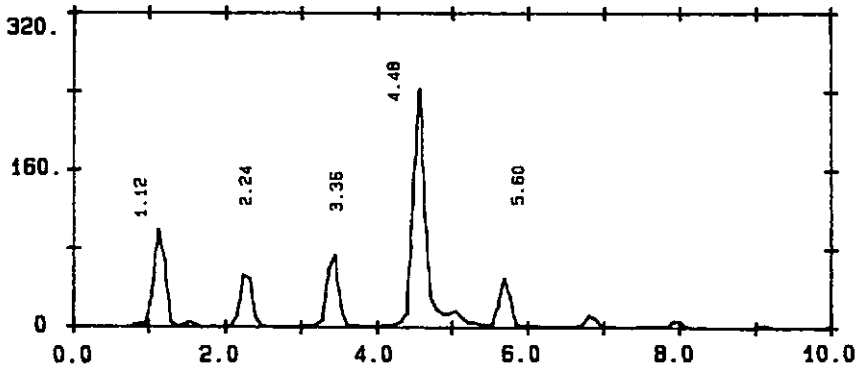
(A) - Resposta no tempo de variação da força no tendão 3



(B) - Resposta no tempo de variação da força no tendão 4

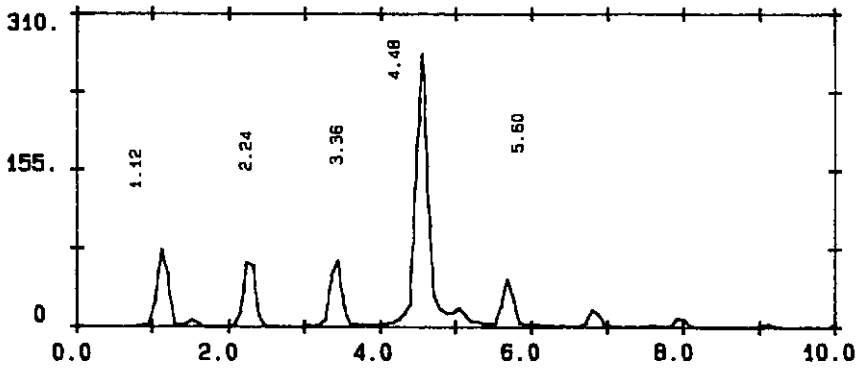
FIGURA IV.58 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 60 graus com a direção surge.

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s \hat{q} /Hz)]



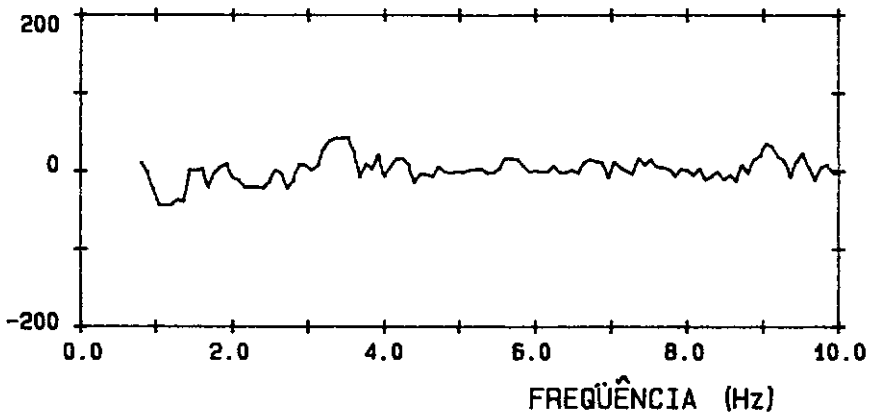
(A) Espectro de frequência da aceleração do acelerômetro ACZ1

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s \hat{q} /Hz)]



(B) Espectro de frequência da aceleração do acelerômetro ACZ3

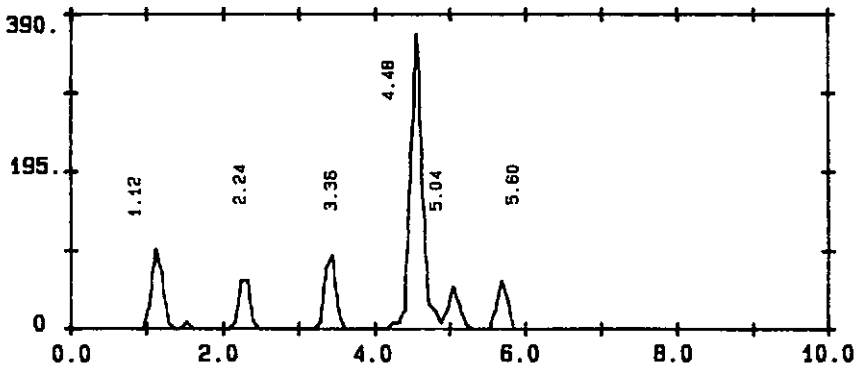
FASE RELATIVA
[graus]



(C) Fase relativa entre as acelerações ACZ1 e ACZ3

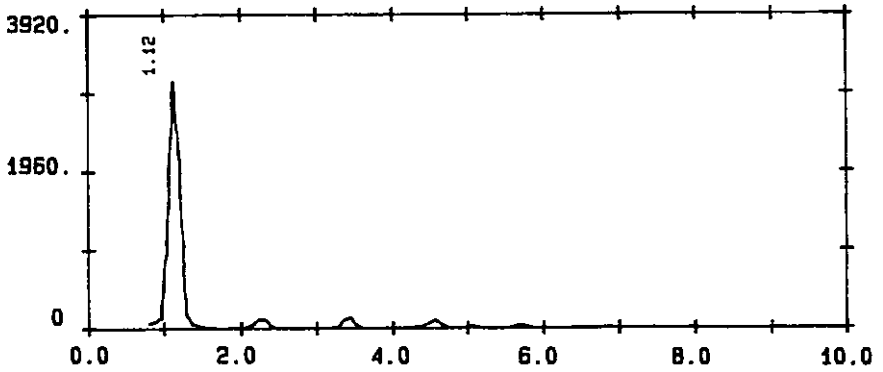
FIGURA IV.59 - Espectros de frequência da aceleração do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 60 graus com a direção surge.

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s² / Hz)



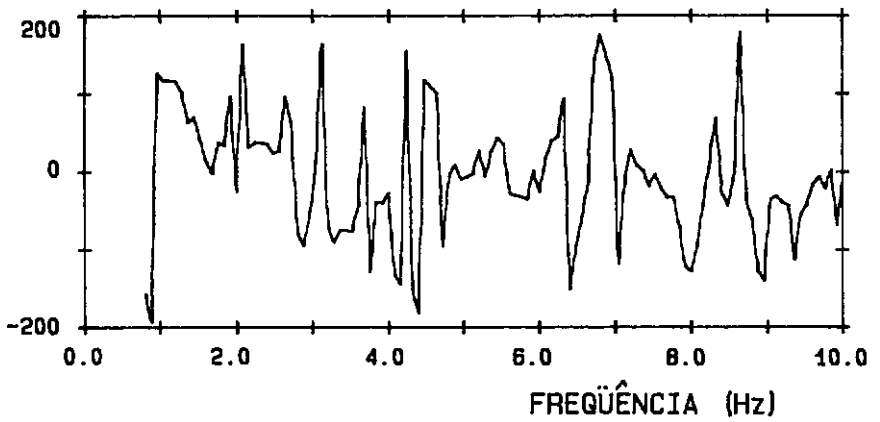
(A) Espectro de frequência da aceleração do acelerômetro ACZ2

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s² / Hz)



(B) Espectro de frequência da aceleração do acelerômetro ACY1

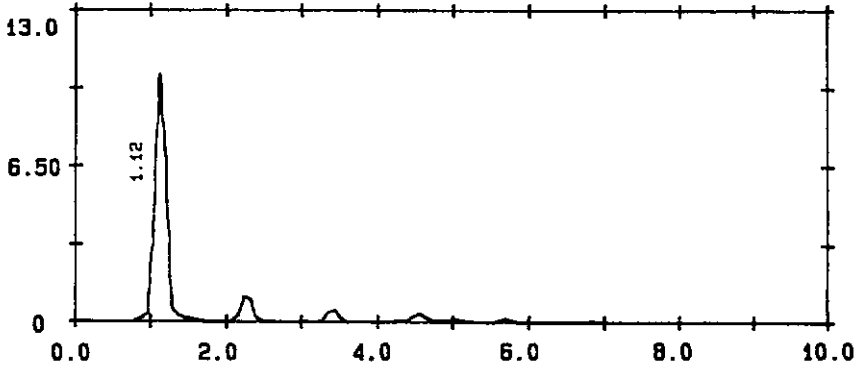
FASE RELATIVA
[graus]



(C) Fase relativa entre as acelerações ACZ2 e ACY1

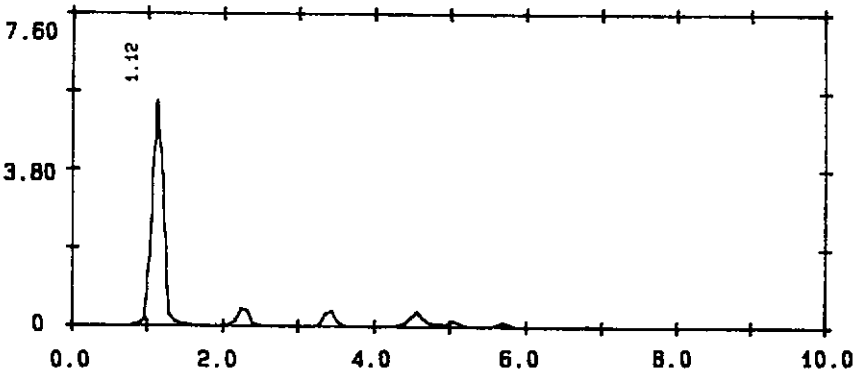
FIGURA IV.60 - Espectros de frequência da aceleração do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 60 graus com a direção surge.

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[N/Hz]



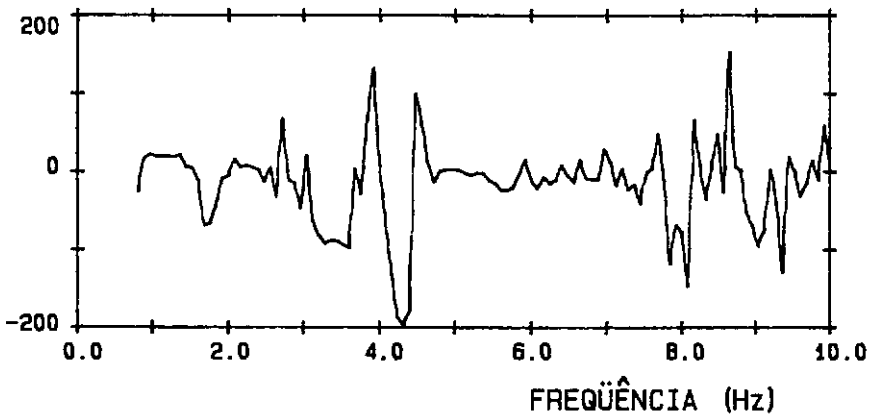
(A) Espectro de frequência da força no tendão 1

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[N/Hz]



(B) Espectro de frequência da força no tendão 3

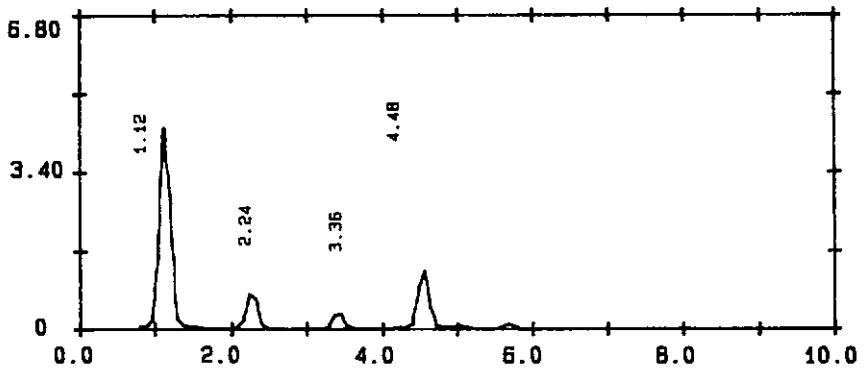
FASE RELATIVA
[graus]



(C) Fase relativa entre as forças nos tendões 1 e 3

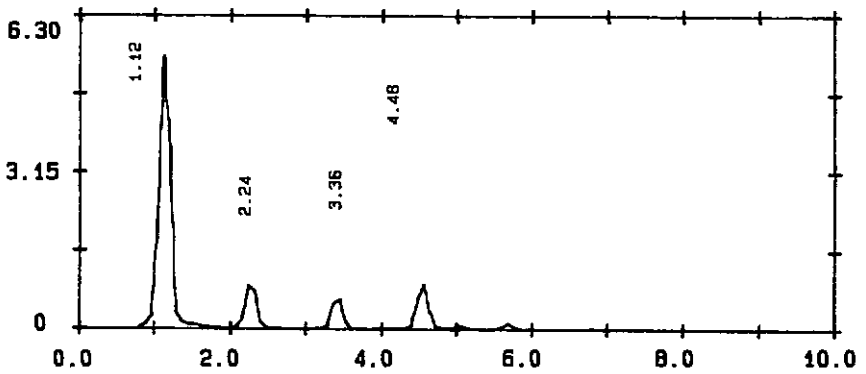
FIGURA IV.61 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 60 graus com a direção surge.

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[N/Hz]



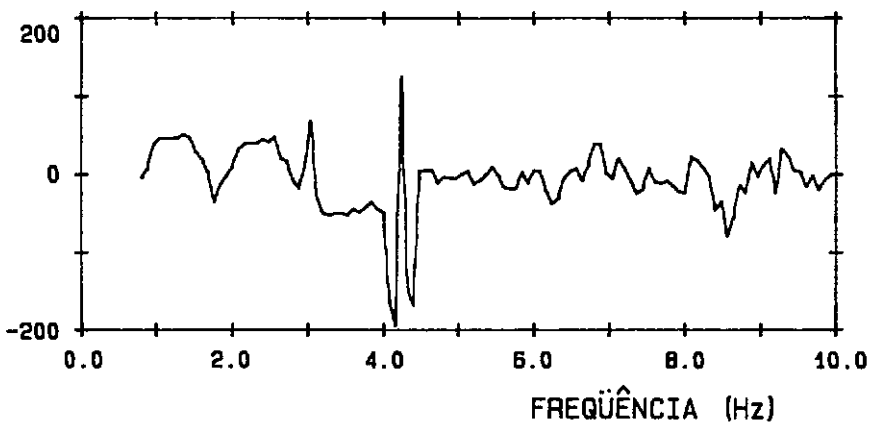
(A) Espectro de frequência da força no tendão 2

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[N/Hz]



(B) Espectro de frequência da força no tendão 4

FASE RELATIVA
[graus]



(C) Fase relativa entre as forças nos tendões 2 e 4

FIGURA IV.62 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 60 graus com a direção surge.

IV.3.4 - Ondas Inclinadas de 90° com a Direção Surge

A figura IV.63 mostra o ensaio sob ondas inclinadas de 90° com a direção surge, e a figura IV.64 nos dá uma visão geral destes ensaios. As ondas utilizadas nesta bateria de ensaios tinham 65 mm de altura e período de 0,89 segundos. As características das ondas podem ser observadas na figura IV.65.

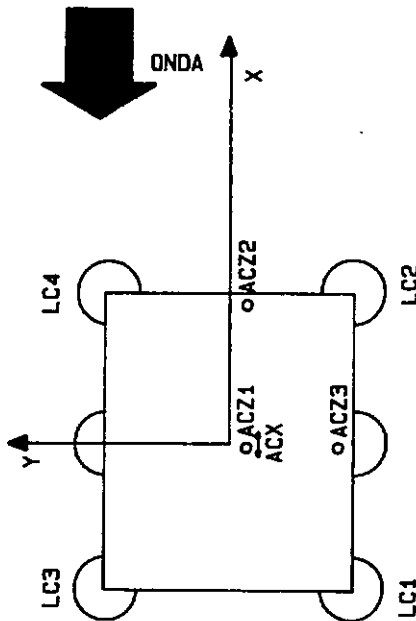


Figura IV.63 - Ensaio sob a ação de ondas a 90° .

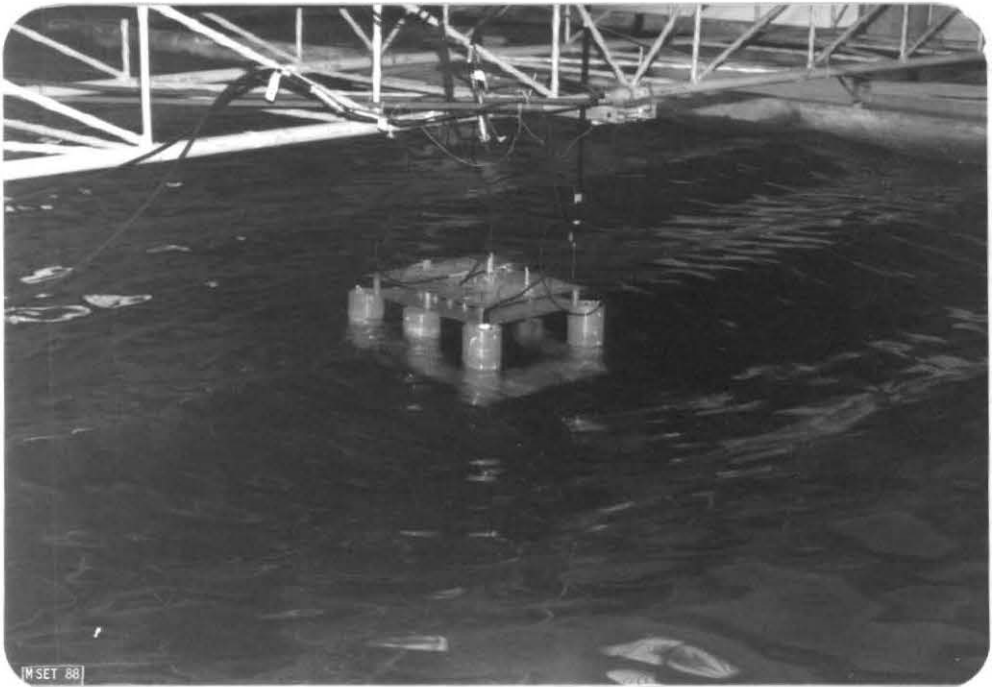


Figura IV.64 - Foto dos ensaios sob a ação de ondas a 90° .

A figura IV.66 (A) mostra a resposta no tempo da aceleração na direção da onda, direção sway, e a figura IV.66 (B) mostra a aceleração na direção heave. As respostas no tempo da variação das forças nos tendões são mostradas nas figuras IV.67 e IV.68. A tabela IV.10 mostra a variação máxima da força nos tendões, onde observamos mais uma vez que os tendões LC2 e LC4 apresentam variações menores que os outros LC1 e LC3 por receberem inicialmente as ondas e por não sofrerem tanto o efeito da variação do empuxo.

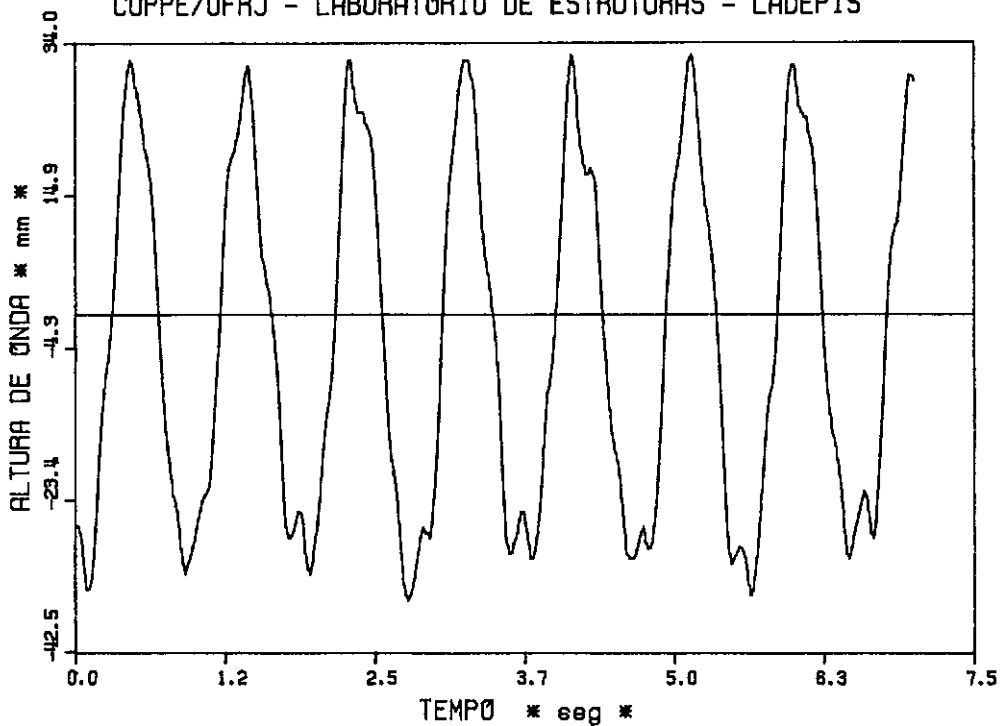
Tabela IV.10- Variação máxima da força nos tendões para ondas inclinadas de 90° com surge.

	LC1	LC2	LC3	LC4
FORÇA (N)	0,97	0,71	0,94	0,56

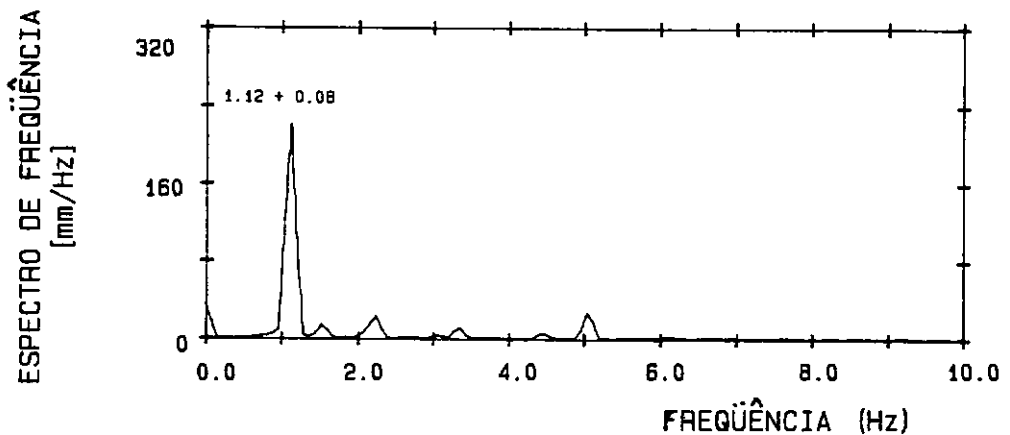
As respostas no domínio da frequência para os ensaios sob ação de ondas incidindo em 90° com a direção surge são apresentados a seguir. A figura IV.69 mostra os espectros de frequência para as acelerações medidas nos acelerômetros ACZ1 e ACZ2, enquanto que na figura IV.70 pode ser observada a aceleração medida no acelerômetro ACZ3 da direção heave e a aceleração na direção sway do acelerômetro ACX. Os espectros das forças nos tendões LC1 e LC2 são vistos na figura IV.71 e os espectros das forças nos tendões LC3 e LC4, na figura IV.72.

Observando os espectros obtidos e as respostas no tempo pode se afirmar a quase inexistência de acoplamento para estes ensaios, sendo o modelo excitado praticamente somente na frequência da onda.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



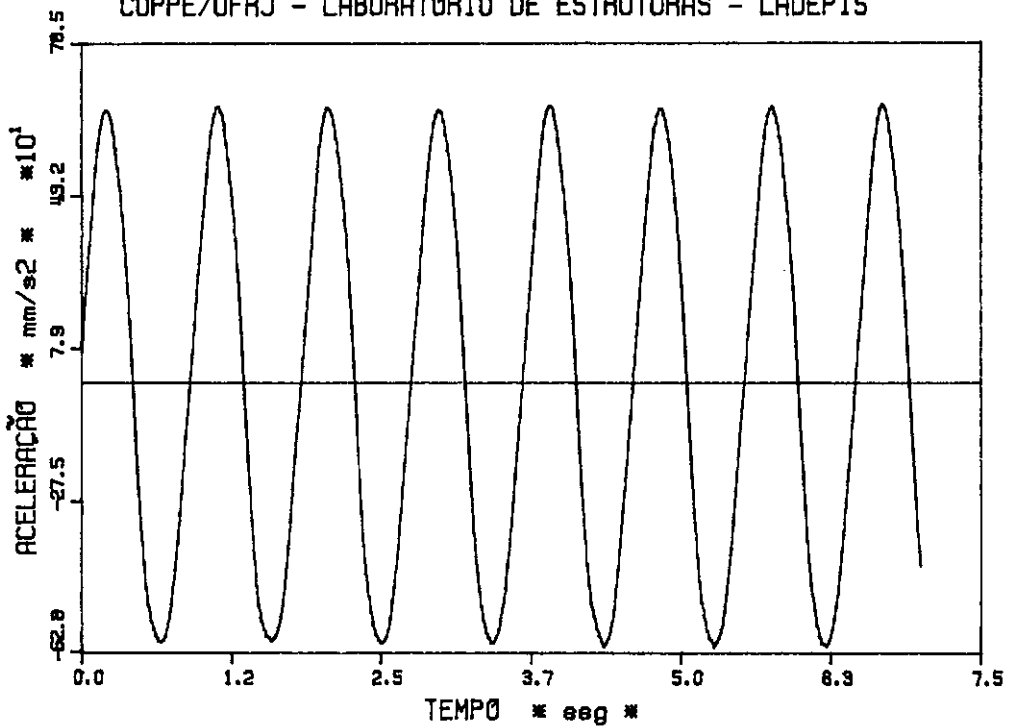
(A) - Altura de onda x tempo



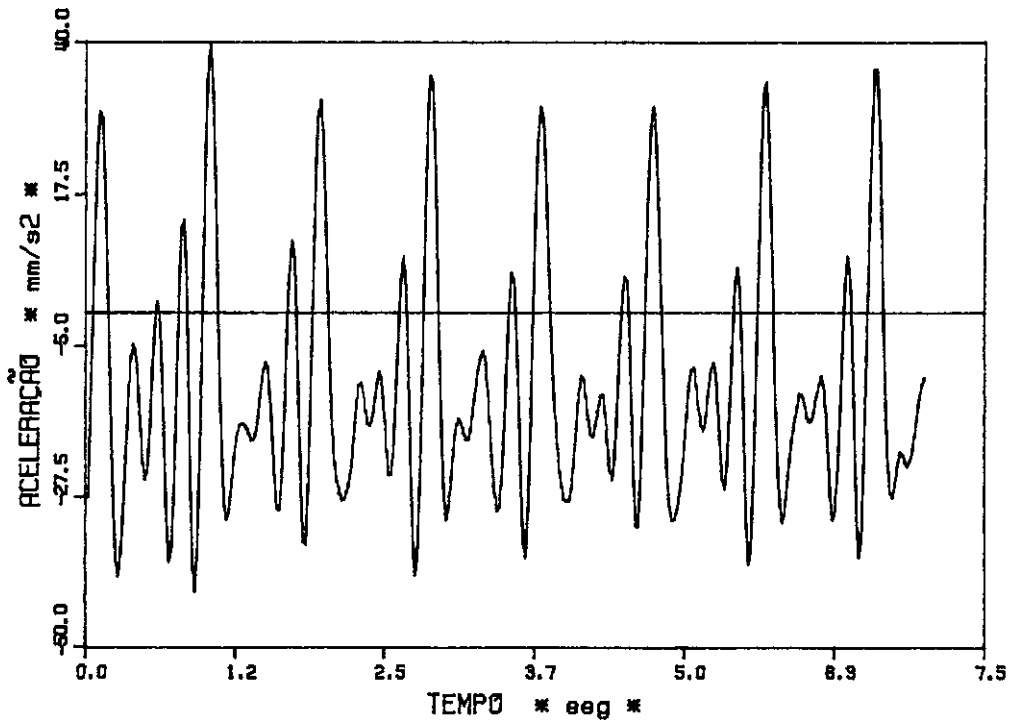
(B) Espectro de frequência da altura de onda

FIGURA IV.65 - Resposta no tempo e espectro de frequência das ondas experimentais inclinadas de 90 graus com a direção surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



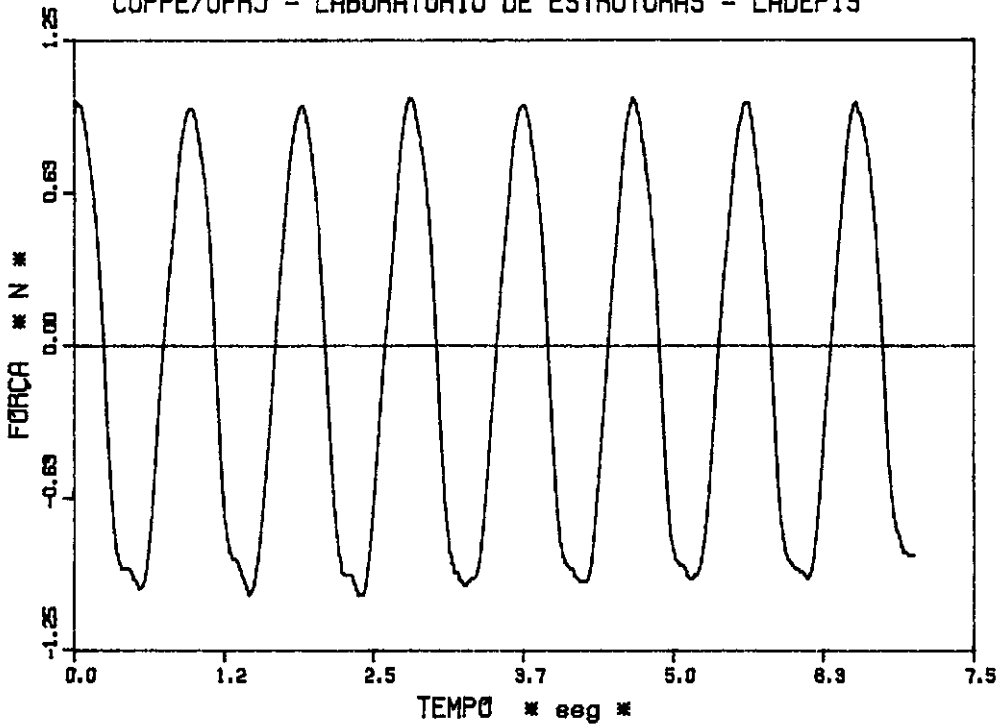
(A) - Resposta no tempo de aceleração na direção sway (ACX)



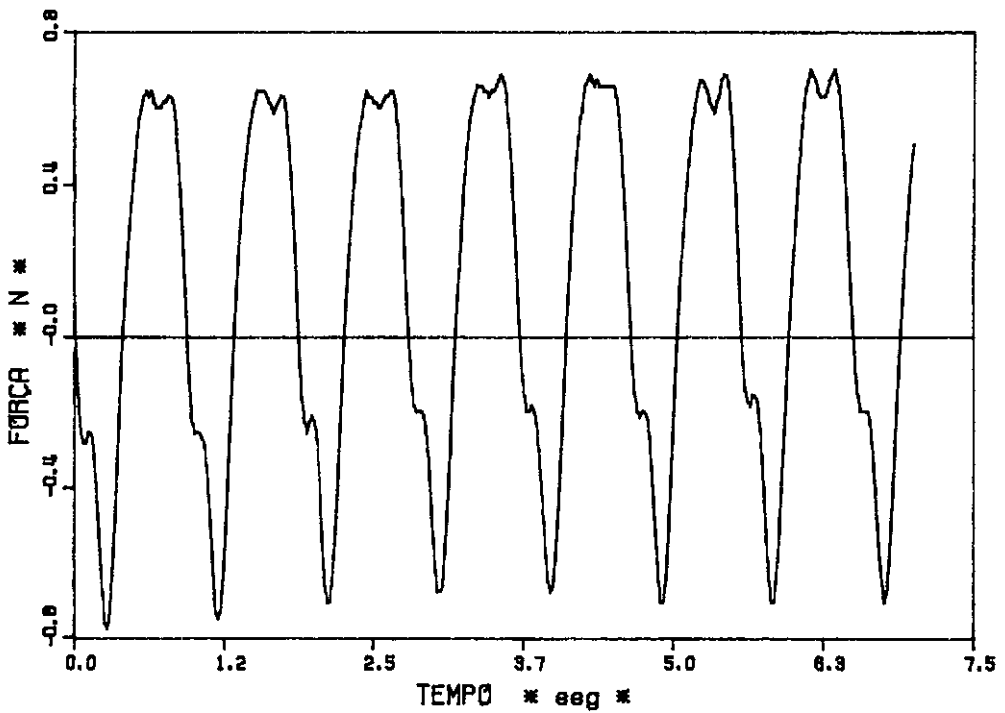
(B) - Resposta no tempo de aceleração na direção heave (ACZ1)

FIGURA IV.66 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 90 graus com a direção surge.

COPPE/UFAJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



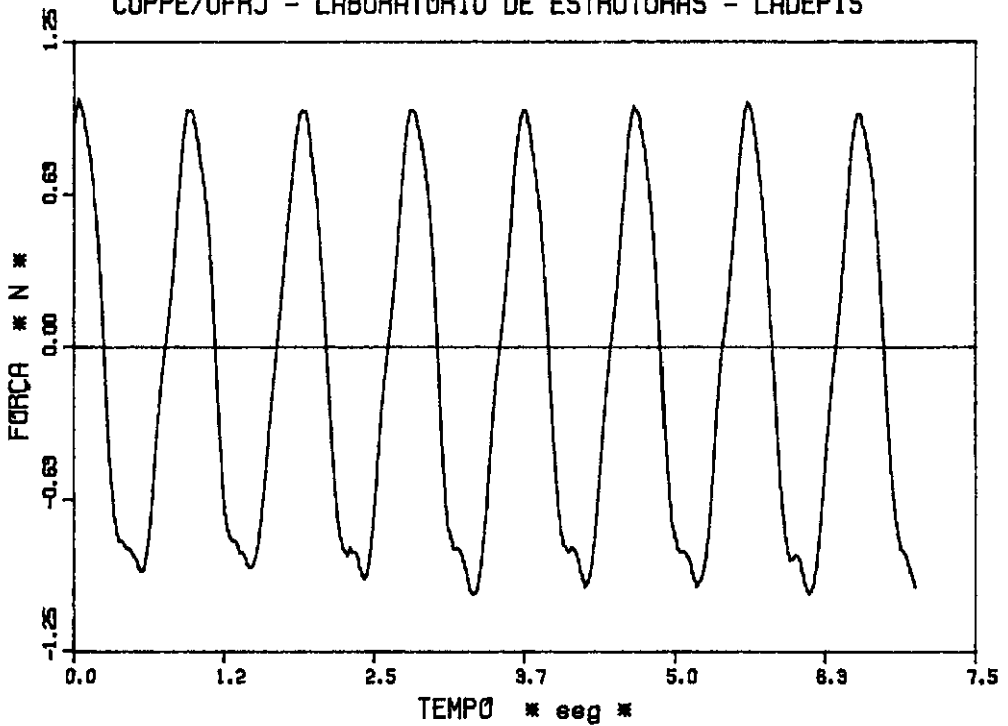
(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1



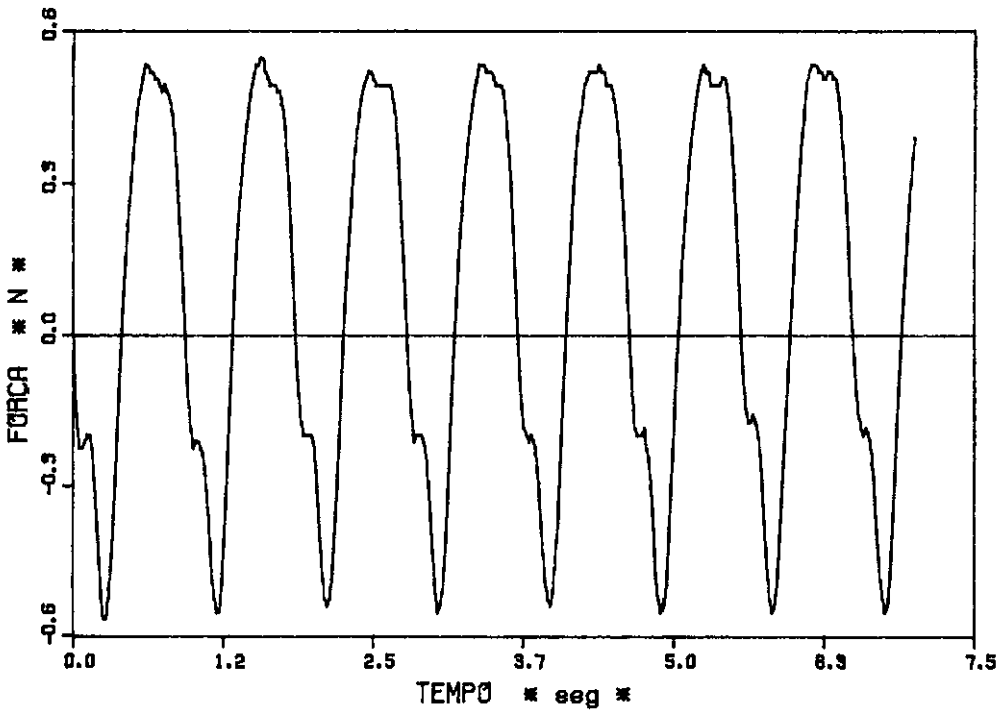
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA IV.67 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 90 graus com a direção surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



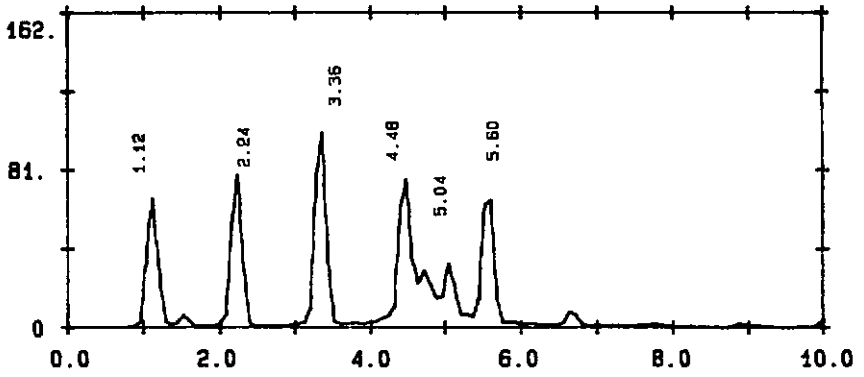
(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 3



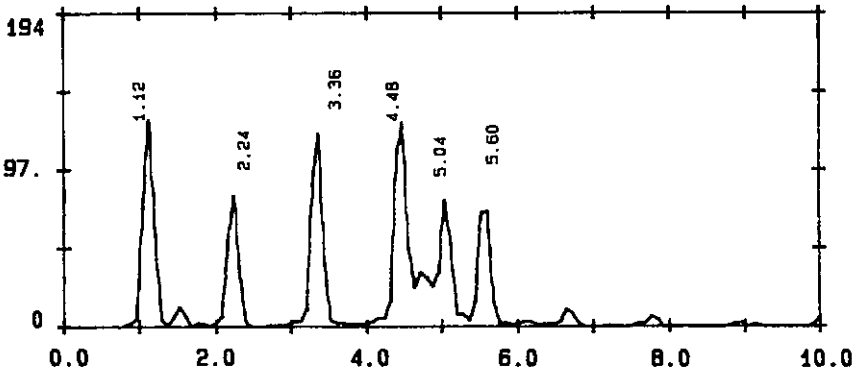
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 4

FIGURA IV.68 - Resposta no tempo dos ensaios experimentais do modelo sob ação de ondas inclinadas de 90 graus com a direção surge.

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s²/Hz)]



ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s²/Hz)]



FASE RELATIVA
[graus]

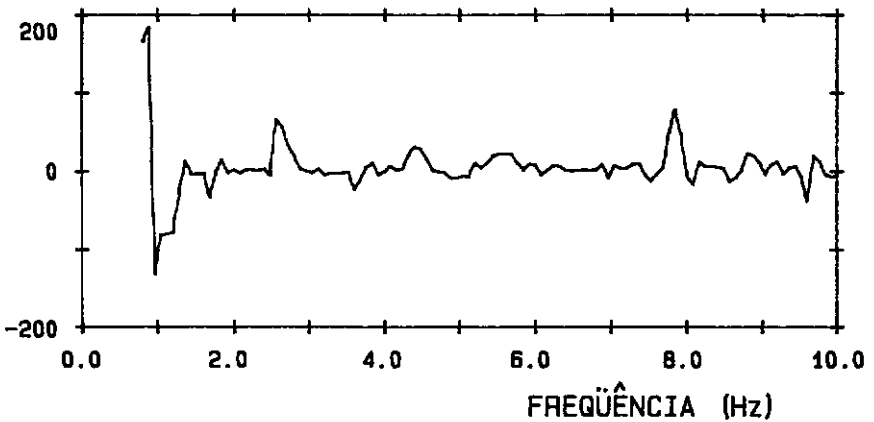
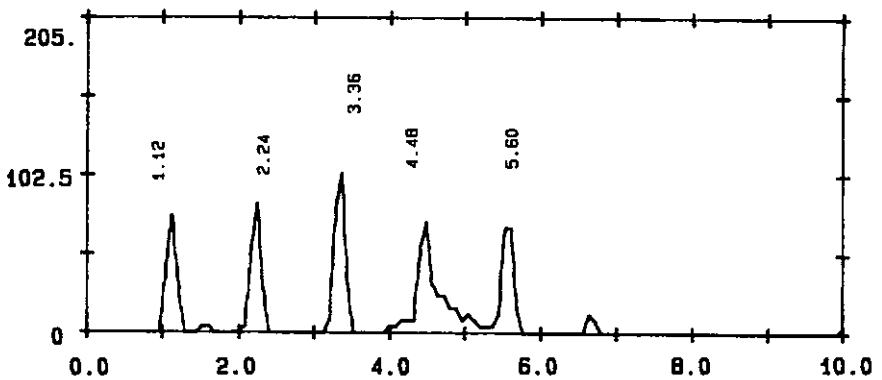
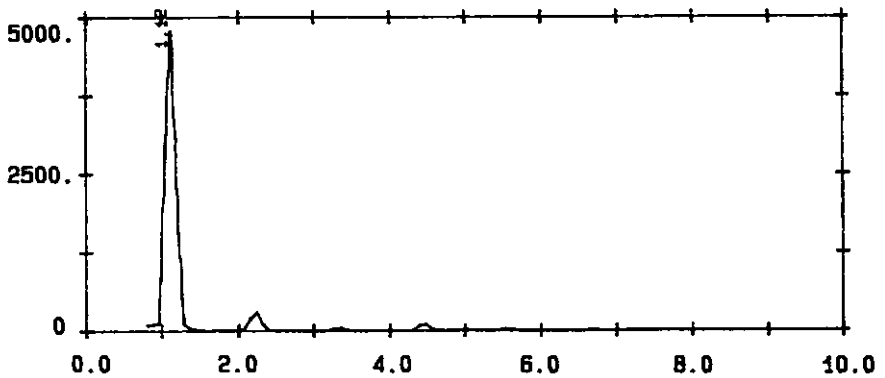


FIGURA IV.69 - Espectros de frequência da aceleração do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 90 graus com a direção surge.

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s²)/Hz]



ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[(mm/s²)/Hz]



FASE RELATIVA
[graus]

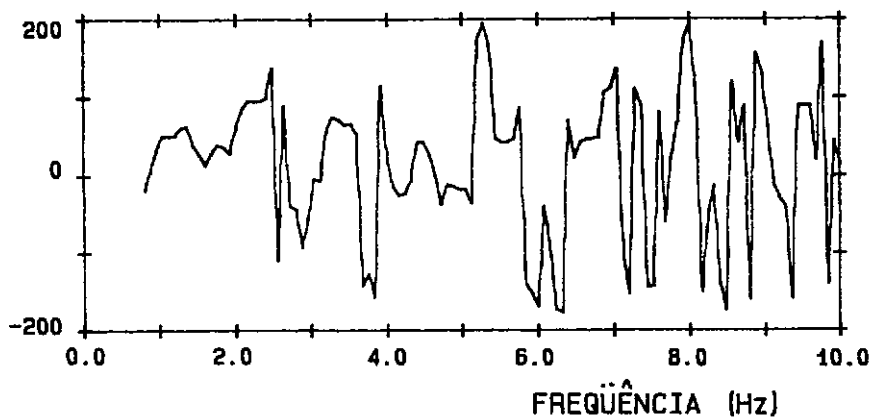
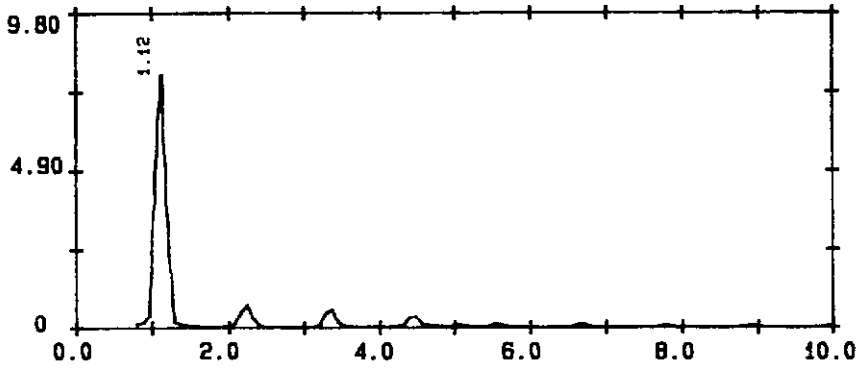


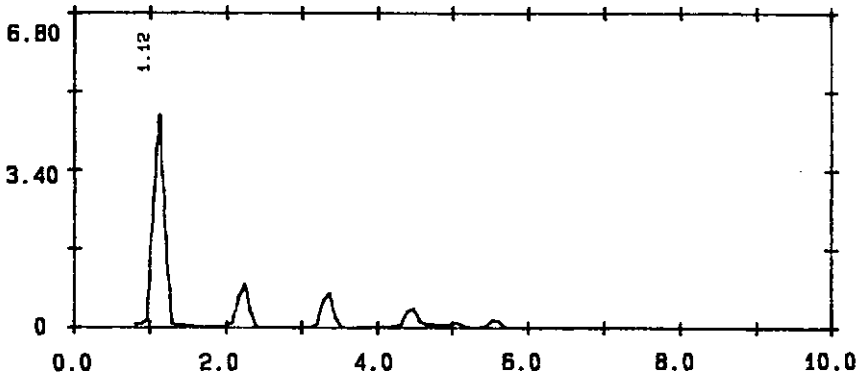
FIGURA IV.70 - Espectros de frequência da aceleração do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 90 graus com a direção surge.

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[N/Hz]



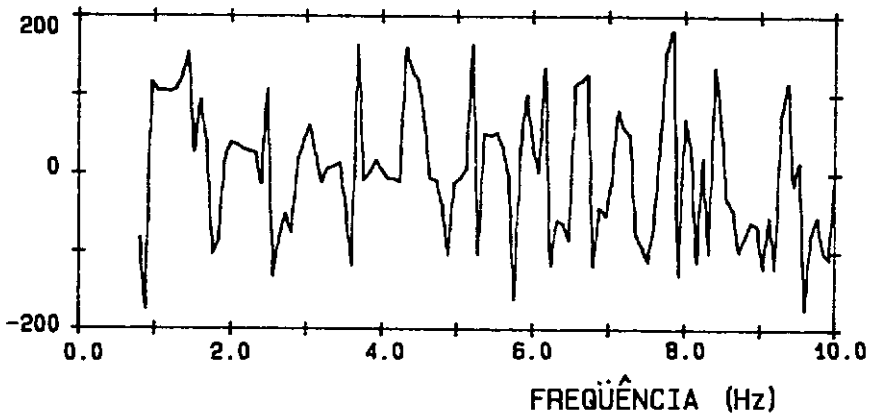
(A) Espectro de frequência da força no tendão 1

ESPECTRO DE FREQUÊNCIA
[N/Hz]



(B) Espectro de frequência da força no tendão 2

FASE RELATIVA
[graus]



(C) Fase relativa entre as forças nos tendões 1 e 2

FIGURA IV.71 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 90 graus com a direção surge.

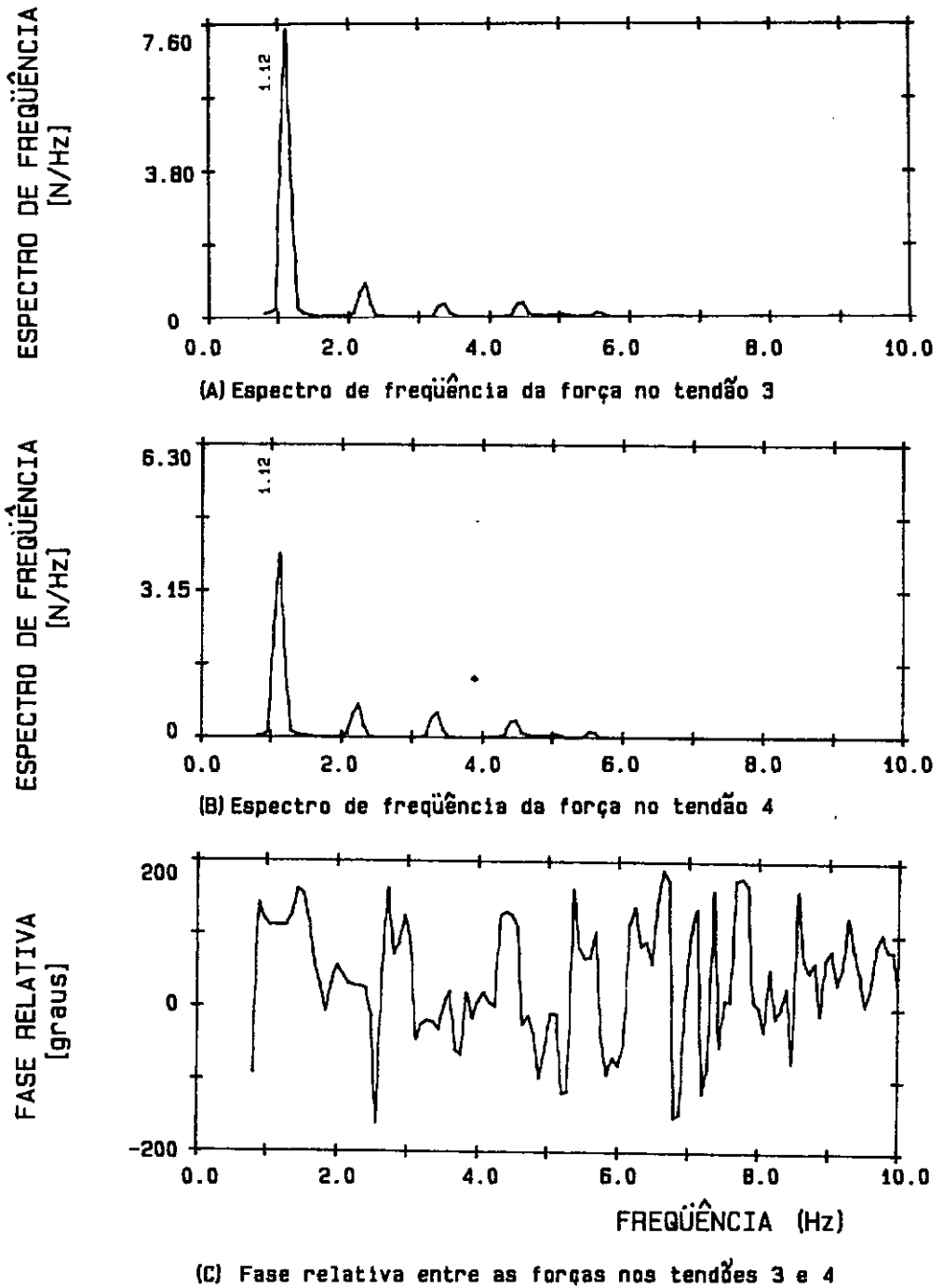


FIGURA IV.72 - Espectros de frequência da força nos tendões do modelo quando submetido à ação de ondas inclinadas de 90 graus com a direção surge.

CAPÍTULO V

RESULTADOS NUMÉRICOS

V.1 - Introdução

Os resultados teórico-numéricos apresentados a seguir foram obtidos utilizando o programa TLP [2], descrito no item III.3. Para as simulações numéricas foram discretizados o modelo utilizado nos ensaios e também o protótipo idealizado. Com o objetivo de utilizar os resultados teóricos para comparações posteriores com resultados obtidos de ensaios experimentais foram adotados como dados de entrada as excitações medidas durante os ensaios, como por exemplo as forças de impacto e as alturas de onda no tempo.

V.2 - Simulação de Vibrações Livres

O programa utilizado calcula as frequências naturais e a resposta da estrutura no tempo, dando como resultados as acelerações, as velocidades e os deslocamentos nas 6 direções, além da força nos tendões. A seguir são apresentados os resultados obtidos para a simulação de vibrações livres do modelo construído e do protótipo.

V.2.1 - Obtenção dos Períodos Naturais

Para a obtenção das períodos naturais do modelo

reduzido e do protótipo, foram utilizadas as modelagens físicas e numéricas descritas nos itens III.3 e III.4 do capítulo III respectivamente.

Para a determinação do módulo de elasticidade a ser utilizado na simulação numérica dos tendões do modelo construído, foram realizados ensaios axiais em amostras obtendo-se um valor médio de 2300 MPa.

De acordo com trabalho anterior [1], o coeficiente de inércia (C_M) foi considerado com valor igual a 2.0 para os seis modos principais de vibração.

Como taxa de amortecimento foi usado um valor obtido da análise da taxa de amortecimento do modelo experimental, em função do deslocamento imposto ao modelo e do diâmetro da coluna. Os valores utilizados na simulação numérica se encontram expostos na tabela V.1.

Tabela V.1 - Taxas de amortecimento obtidas experimentalmente e usadas na simulação numérica.

MODOS DE VIBRAÇÃO	TAXA DE AMORTECIMENTO (%)
SWAY	14.55
SURGE	14.55
HEAVE	2.19
PITCH	1.47
ROLL	1.35
YAW	12.00

Para permitir uma melhor comparação dos resultados obtidos para modelo e protótipo, que são apresentados na tabela V.2, os resultados numéricos

obtidos para o modelo construído foram extrapolados para o protótipo, através da escala do tempo (equação II.3).

Tabela V.2 - Períodos naturais obtidos para o modelo e para o protótipo.

MODOS DE VIBRAÇÃO	PERÍODO NATURAL (seg)	
	MODELO	PROTÓTIPO
SWAY	103.76	113.42
SURGE	106.05	113.73
HEAVE	2.67	2.43
PITCH	2.77	2.02
ROLL	2.37	1.75
YAW	61.75	68.82

As diferenças encontradas na tabela V.2 entre as simulações numéricas do modelo construído e do protótipo são explicadas a seguir:

- (a) para os períodos associados aos modos sway, surge e yaw, se devem ao peso do conjunto casco + convés não estar reproduzido rigorosamente em escala;
- (b) para o período associado ao modo heave se deve ao fato de que a rigidez axial dos tendões do modelo ter sido reproduzida cerca de 30 % menor que a calculada pela teoria da semelhança;
- (c) finalmente, para os modos pitch e roll se devem à associação da duas explicações anteriores, (a) e (b).

V.2.2 - Resposta no Tempo

Para a obtenção da resposta do modelo no tempo quando submetido a impactos, foi implementada uma subrotina que simulava estes impactos, que por sua vez

foram medidos nos ensaios experimentais para este fim. Como não se levou em conta na hora da realização dos ensaios experimentais a direção exata dos impactos, devido à dificuldade encontrada para se excitar o modelo, os resultados apresentados a seguir serão considerados com inclinações que mais se aproximaram dos resultados experimentais, ou seja, de 5° a 10° da direção exata dos impactos.

Na figura V.1 (A) e (B) podem ser observadas as respostas no tempo da aceleração na direção sway e da variação da força no tendão 1 da simulação do impacto excitando o modo sway.

Os resultados da simulação dos impactos excitando o modo surge são apresentados na figura V.2, onde na figura V.2 (A) temos a aceleração na direção surge e na figura V.2 (B) temos a variação da força no tendão 1.

A figura V.3 (A) mostra a resposta no tempo da aceleração na direção heave e a figura V.3 (B) mostra a variação da força no tendão 1 quando da simulação do impacto excitando o modo heave de vibração do modelo.

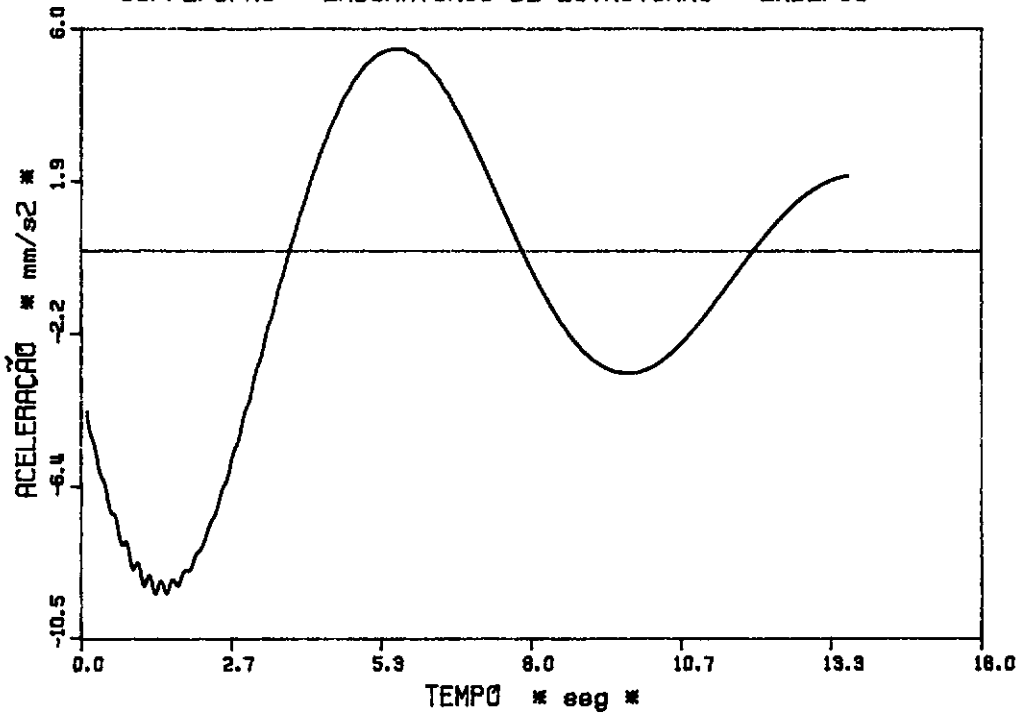
As figuras V.4 (A) e (B) apresentam respectivamente as respostas no tempo da rotação na direção pitch e da variação da força no tendão 1 para a simulação do impacto excitando o modo pitch do modelo.

Os resultados obtidos com a simulação do impacto excitando o modo roll de vibração do modelo podem ser observados nas figuras V.5 (A) e (B) onde temos a rotação na direção roll e a variação da força no tendão 1.

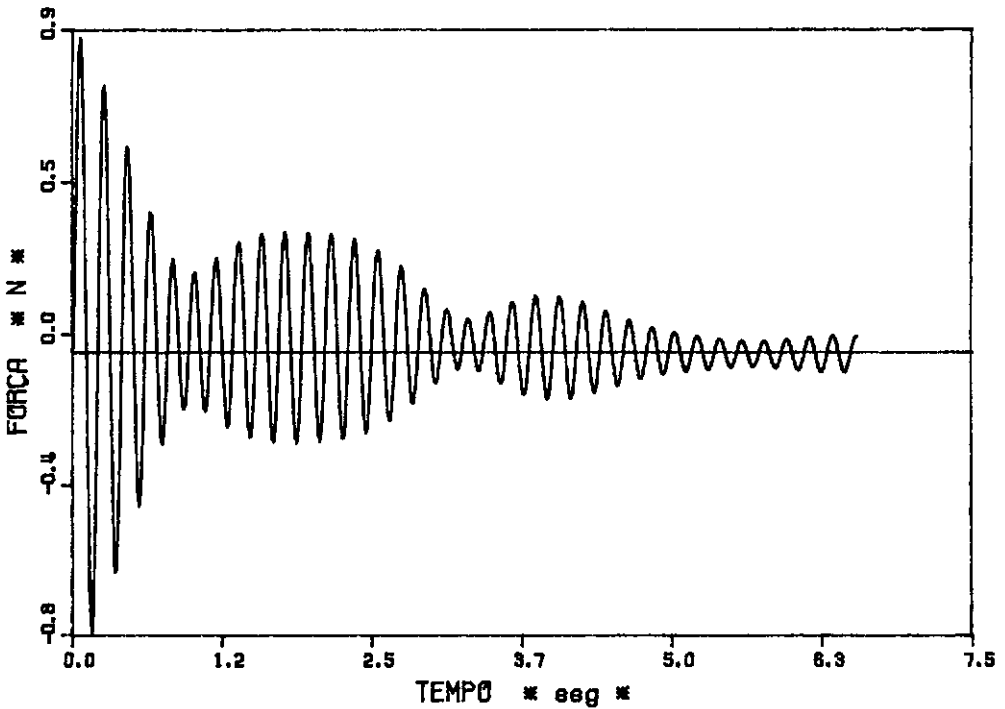
Na figura V.6 (A) pode ser observado a resposta

no tempo da rotação na direção yaw e na figura V.6 (B) temos a variação da força no tendão 1 para a simulação do impacto excitando o modo yaw de vibração do modelo.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



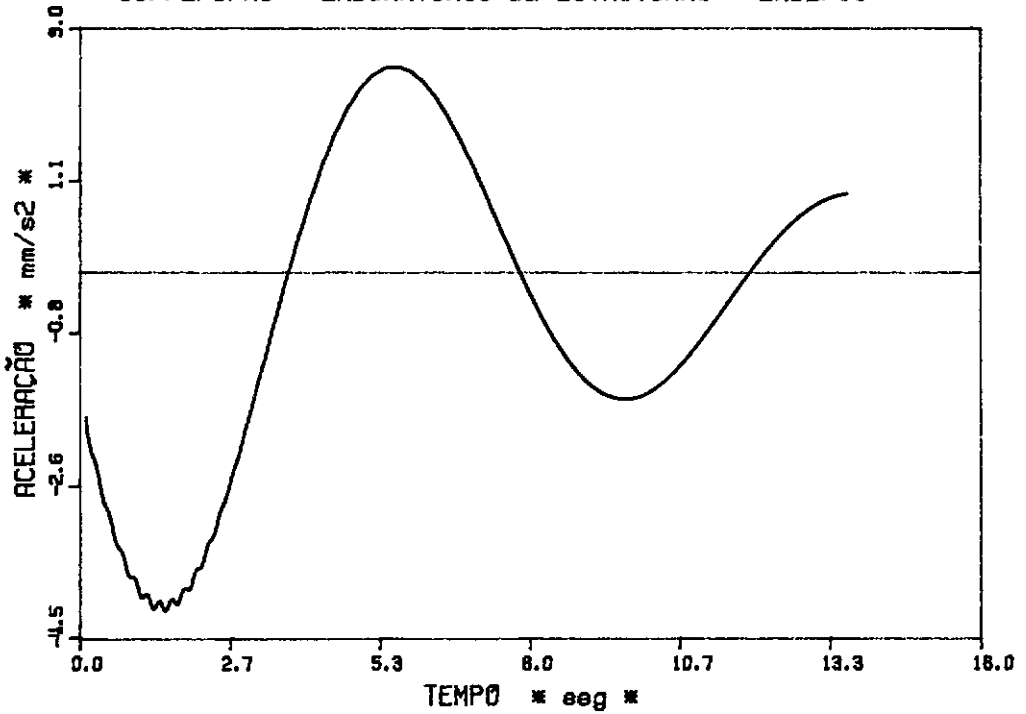
(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção sway



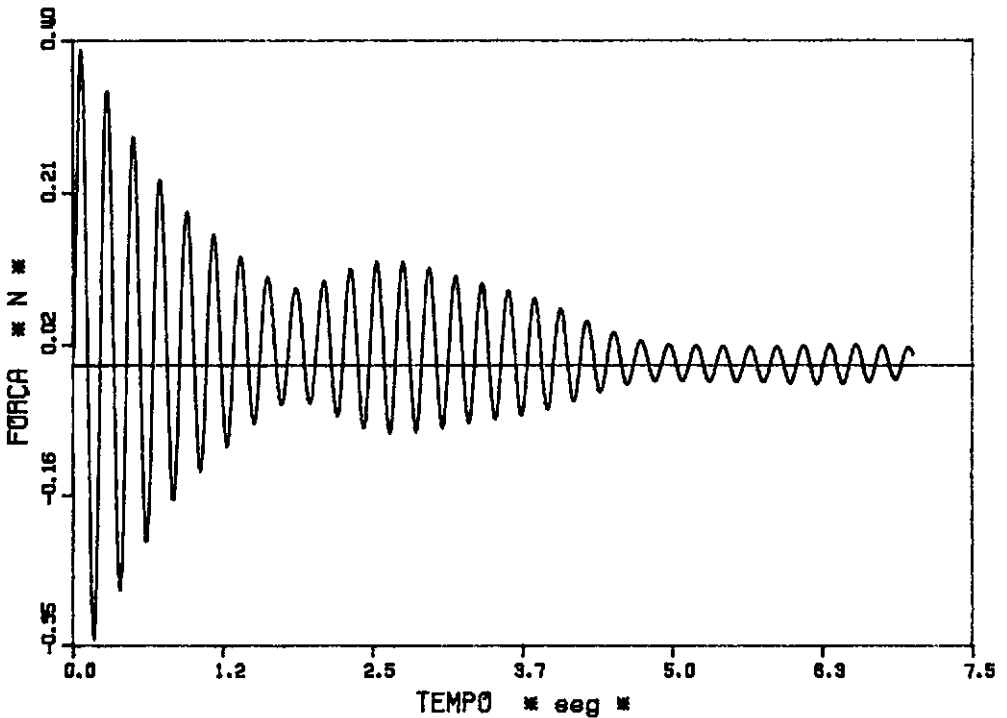
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1

FIGURA V.1 - Resposta no tempo da simulação numérica do modelo sob ação de impactos excitando o modo sway.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



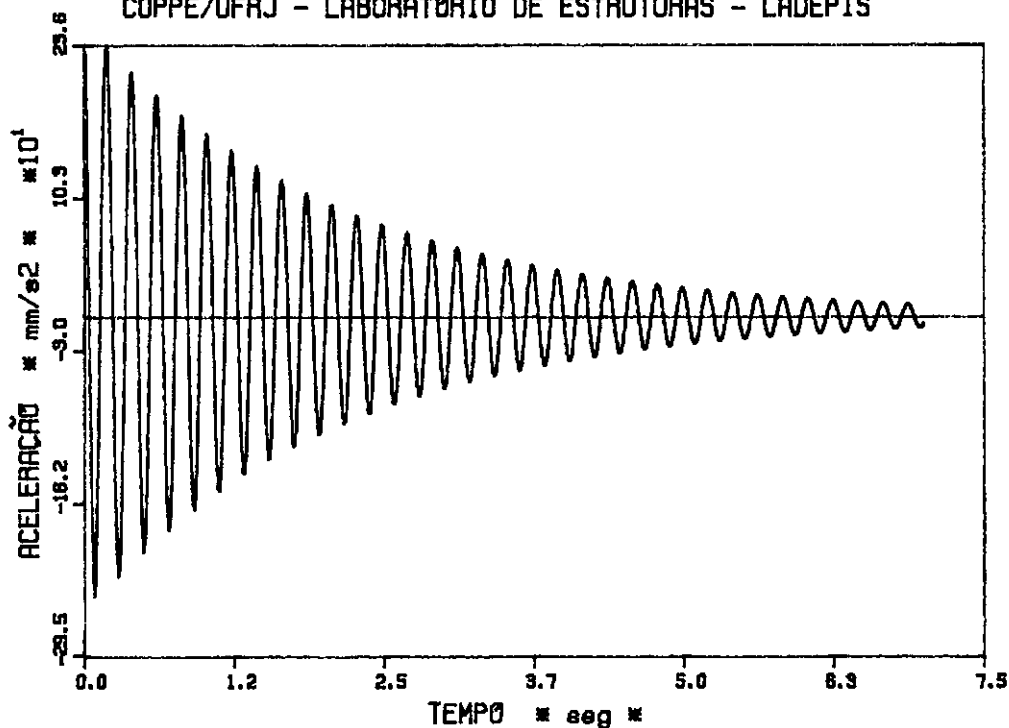
(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge



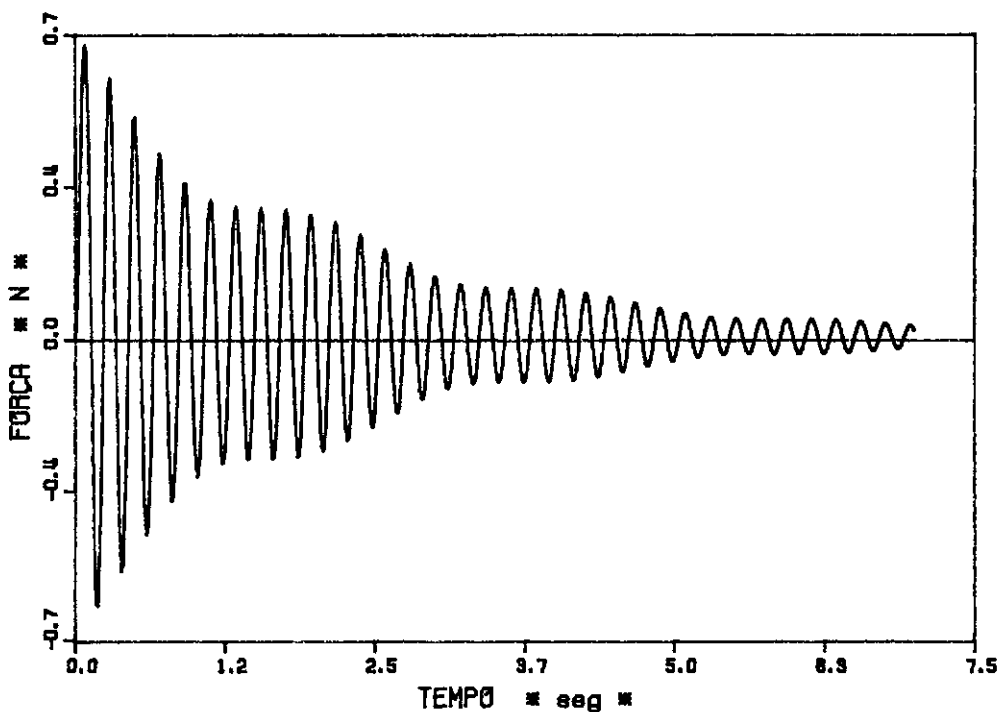
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1

FIGURA V.2 - Resposta no tempo da simulação numérica do modelo sob ação de impactos excitando o modo surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS

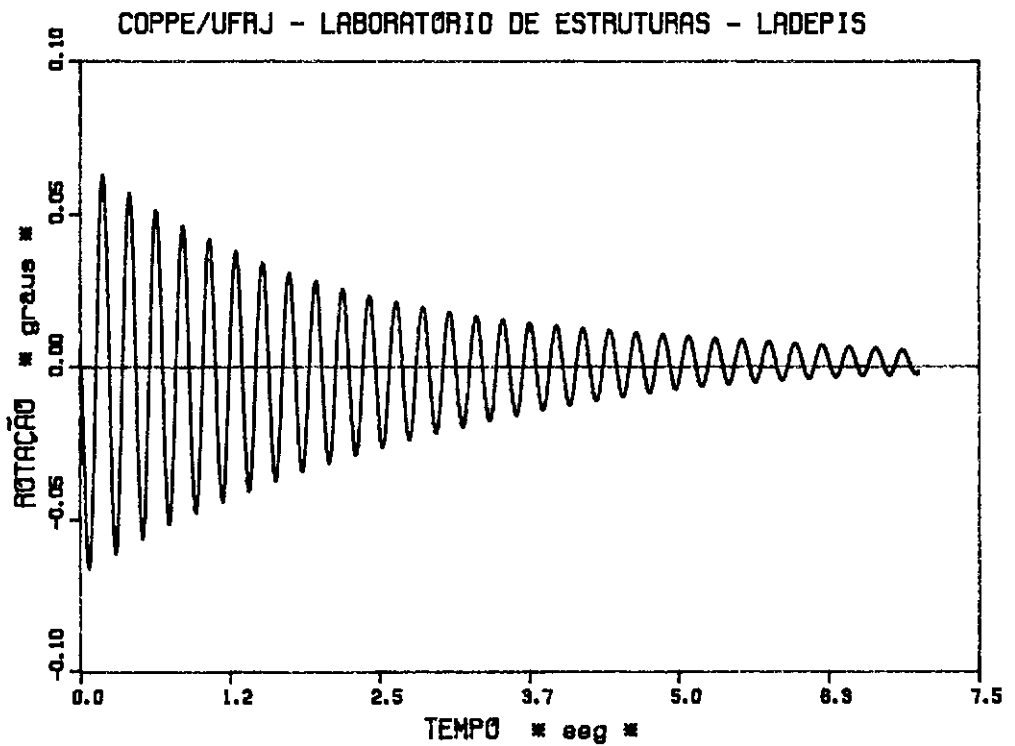


(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção heave

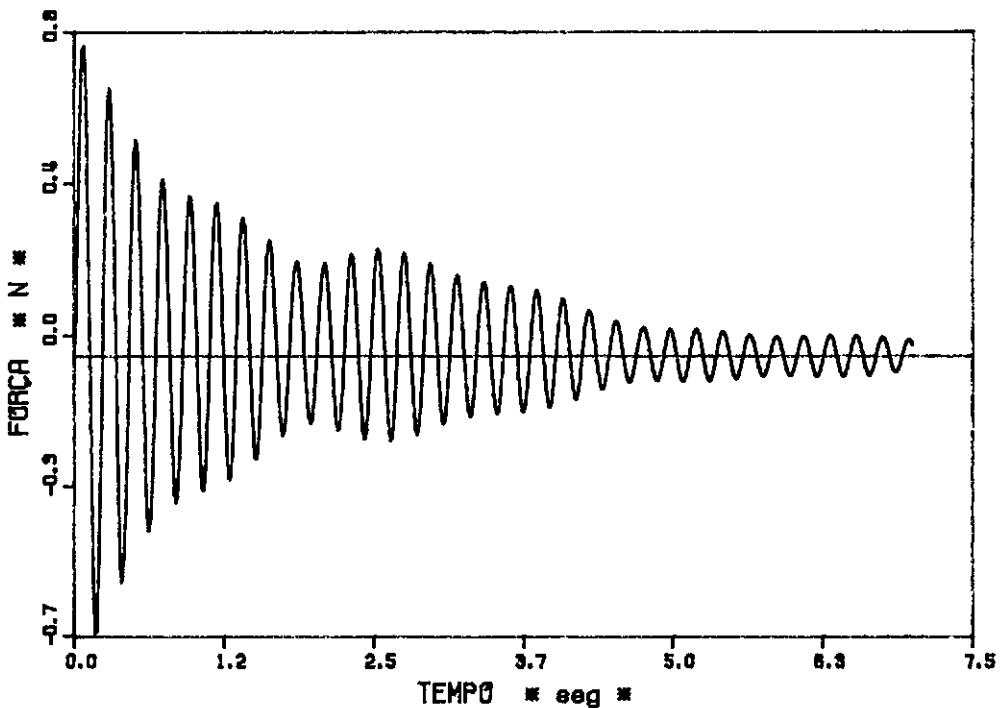


(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1

FIGURA V.3 - Resposta no tempo da simulação numérica do modelo sob ação de impactos excitando o modo heave.



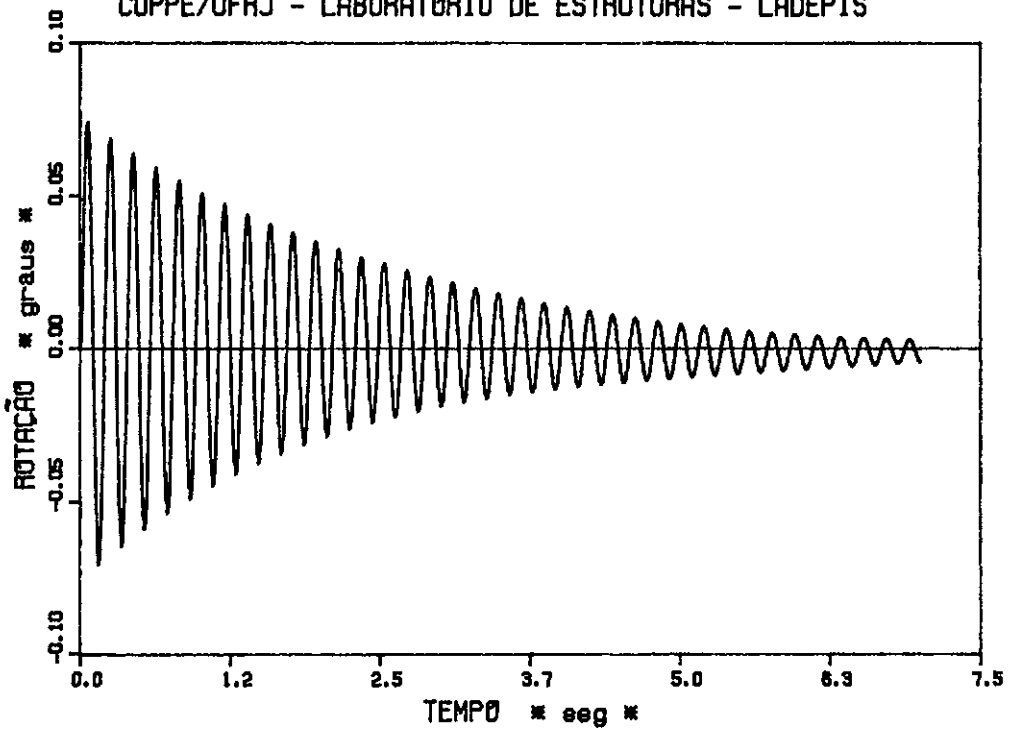
(A) - Resposta no tempo da rotação na direção pitch



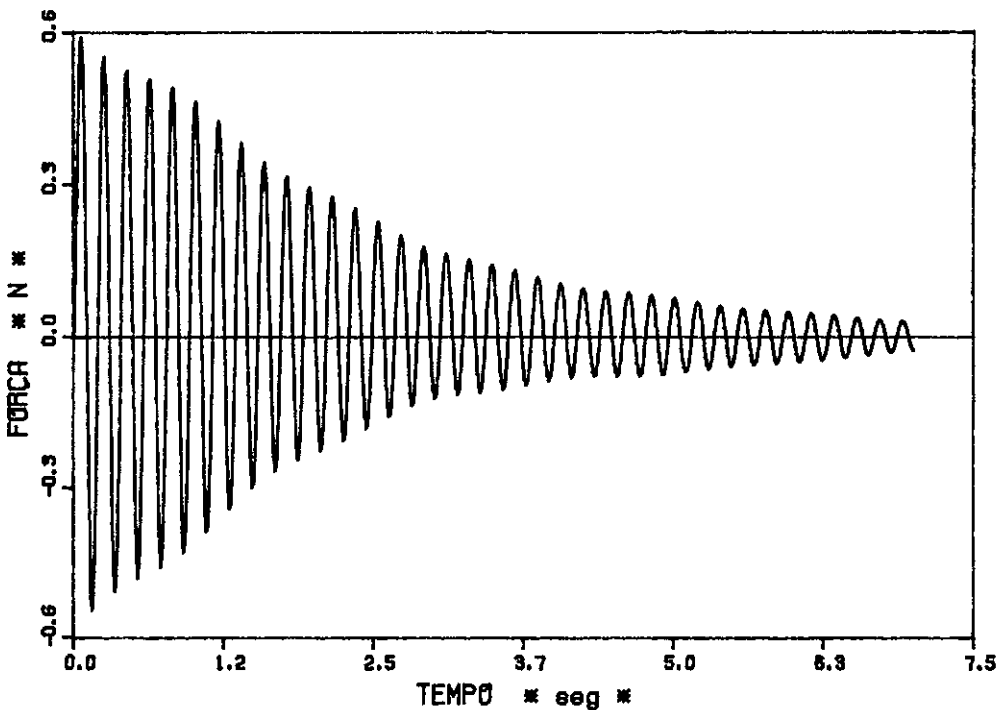
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1

FIGURA V.4 - Resposta no tempo da simulação numérica do modelo sob ação de impactos excitando o modo pitch.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



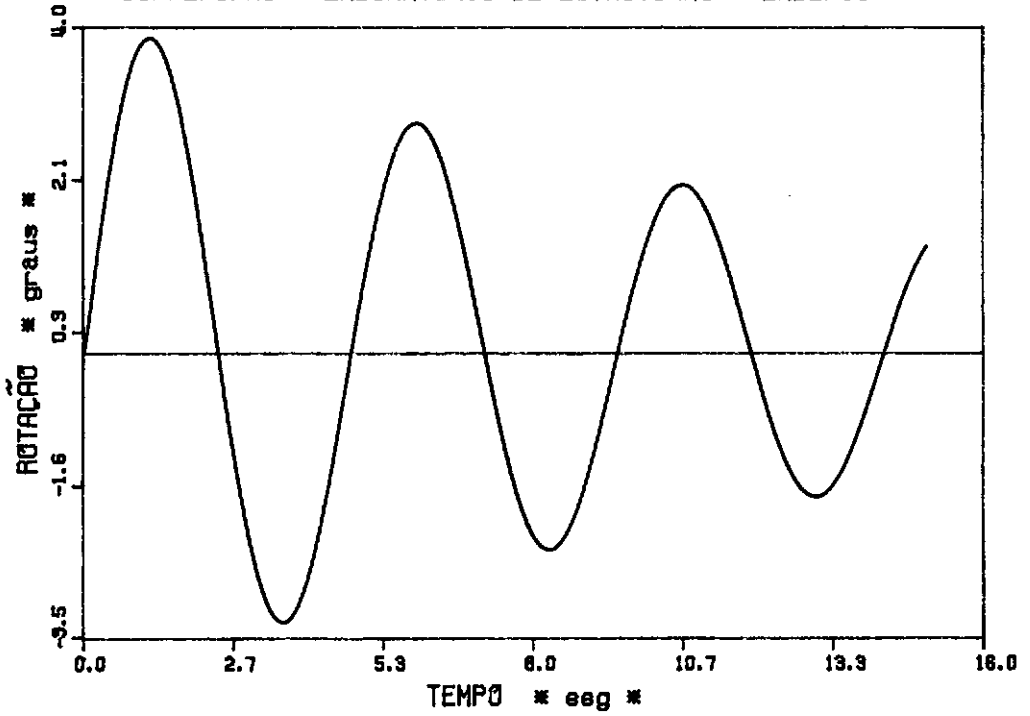
(A) - Resposta no tempo da rotação na direção roll



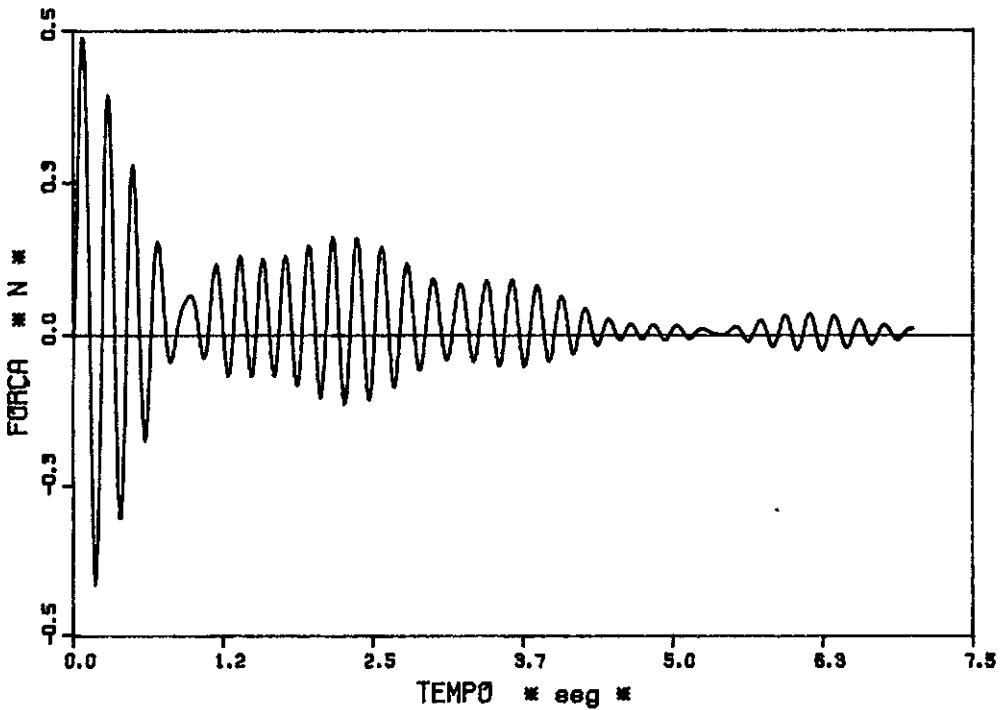
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1

FIGURA V.5 - Resposta no tempo da simulação numérica do modelo sob ação de impactos excitando o modo roll.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da rotação na direção yaw



(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1

FIGURA V.6 - Resposta no tempo da simulação numérica do modelo sob ação de impactos excitando o modo yaw.

V.3 - Simulação da Ação de Ondas

Foram realizadas simulações de ação de ondas com diferentes ângulos de incidências sobre o modelo. Assim como nos ensaios experimentais, foram realizadas simulações de ondas com 0° , 30° , 60° e 90° de incidência com a direção surge. As ondas simuladas foram aquelas registradas experimentalmente nos diversos ensaios. O coeficiente de arrasto (C_p) utilizado foi de 0,49 para as colunas e 1,37 para os flutuadores, e o coeficiente de inércia foi de 2,0, conforme citado anteriormente [1],[6].

Na figura V.7 são mostradas as respostas no tempo da simulação de ondas incidindo com 0° de incidência com a direção surge. A figura V.7 (A) mostra a aceleração na direção surge e a figura V.7 (B) mostra a variação da força no tendão 4. Todas as figuras estão representadas desde o instante de tempo zero, i.e., apresentam a parte transiente e a parte permanente.

As respostas no tempo da simulação de ondas incidindo com 30° sobre o modelo são mostradas na figura V.8, onde a figura V.8 (A) corresponde à aceleração na direção sway, a figura V.8 (B) mostra a aceleração na direção surge e a figura V.8 (C) mostra a variação da força no tendão 4.

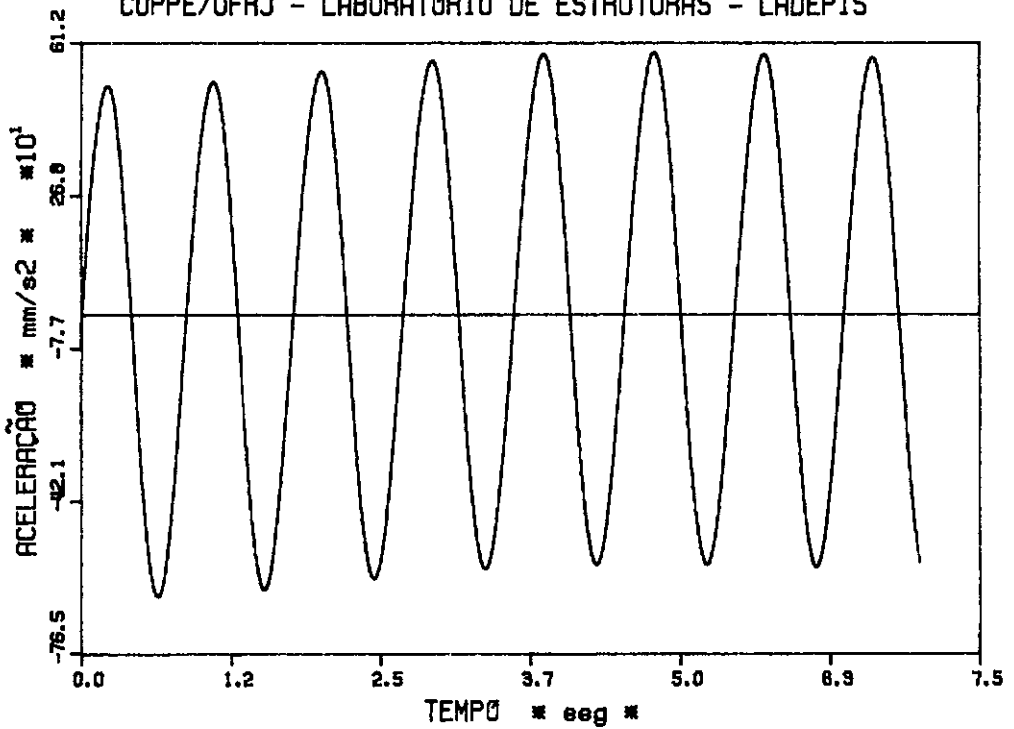
A figura V.9 corresponde à simulação de ondas com incidência de 60° com a direção surge. Na figura V.9 (A) é mostrada a resposta no tempo da aceleração na direção sway, na figura V.9 (B) temos a aceleração na direção surge e na figura V.9 (C) temos a variação da

força no tendão 2.

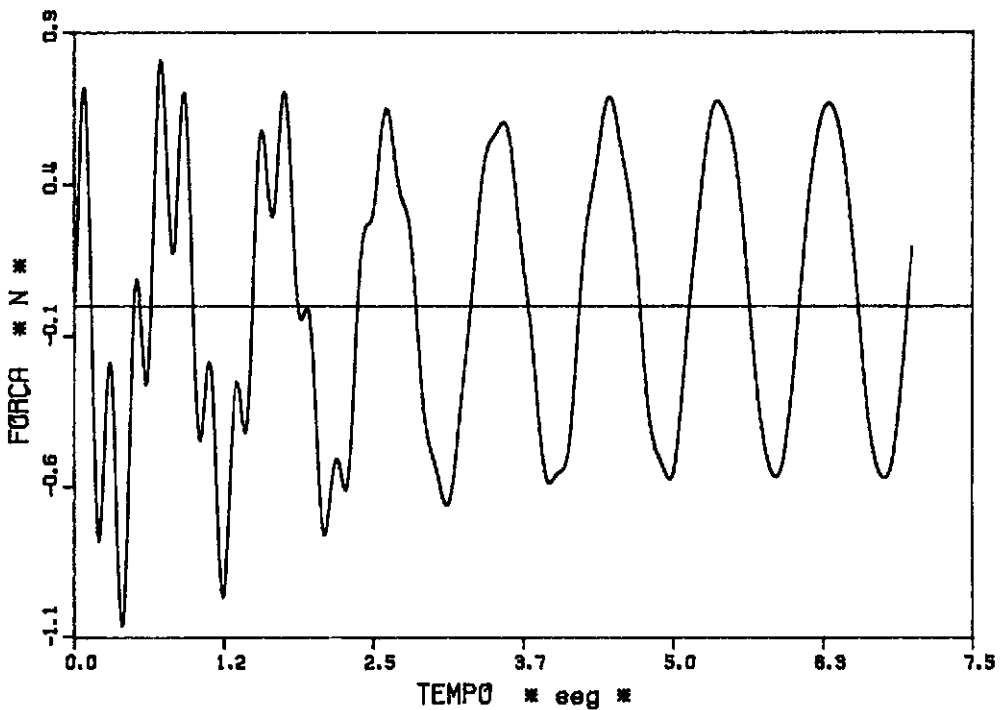
Os resultados da simulação de ondas incidindo em 90° com a direção surge, ou seja, na direção sway, são mostrados na figura V.10, onde temos na figura V.10 (A) a aceleração na direção sway e na figura V.10 (B) a variação da força no tendão 1.

Os resultados apresentados neste capítulo referente aos resultados numéricos e os do capítulo anterior referentes aos resultados experimentais são abordados novamente no capítulo a seguir, onde são comparados e analisados.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



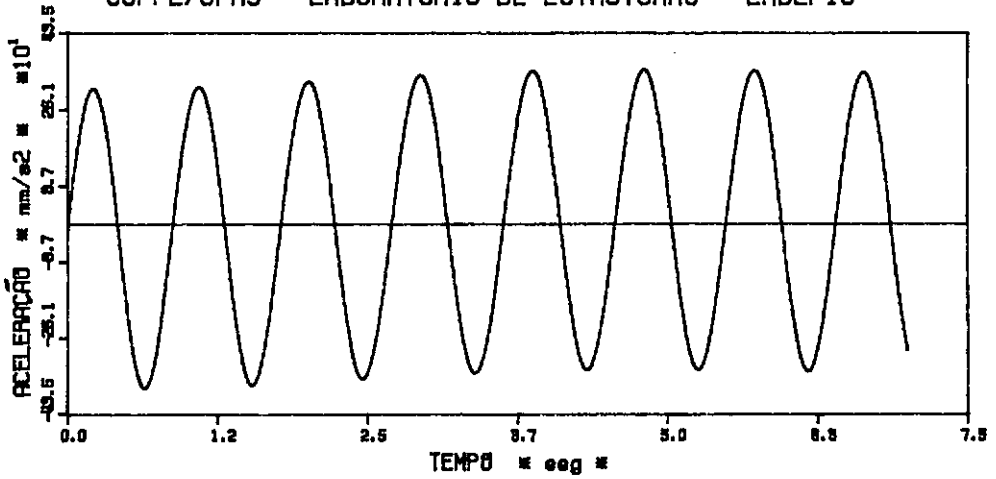
(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge



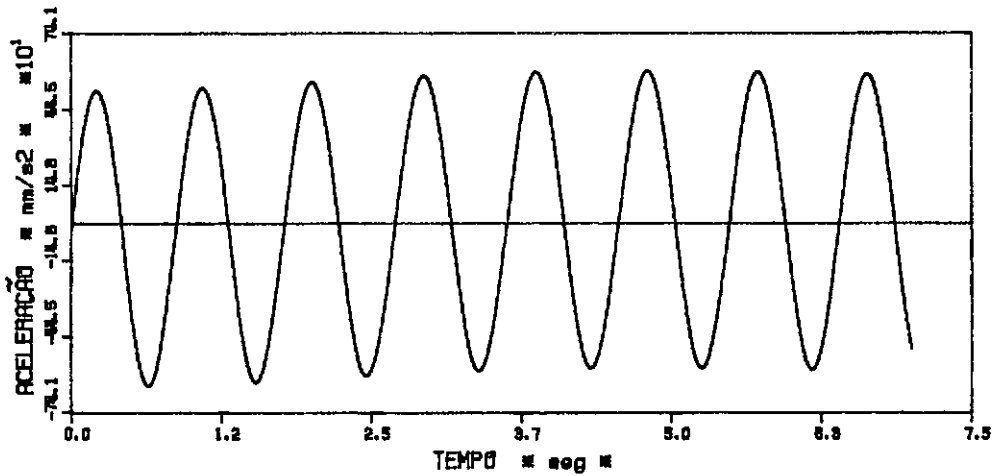
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 4

FIGURA V.7 - Resposta no tempo da simulação numérica do modelo sob ação de ondas inclinadas de 0 graus com a direção surge.

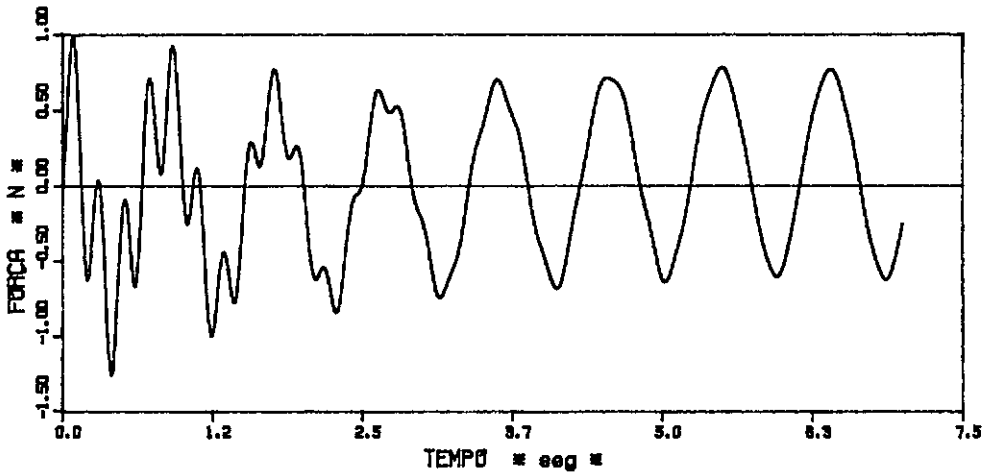
COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção sway



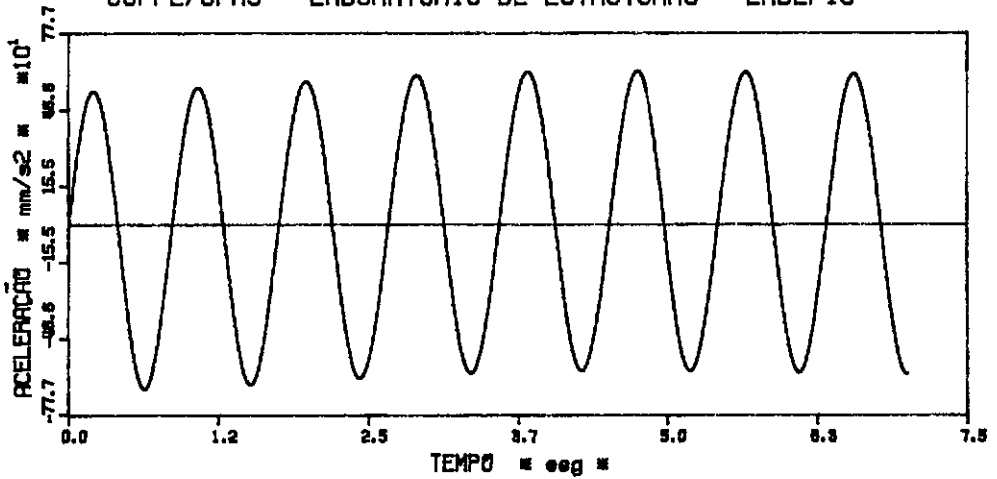
(B) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge



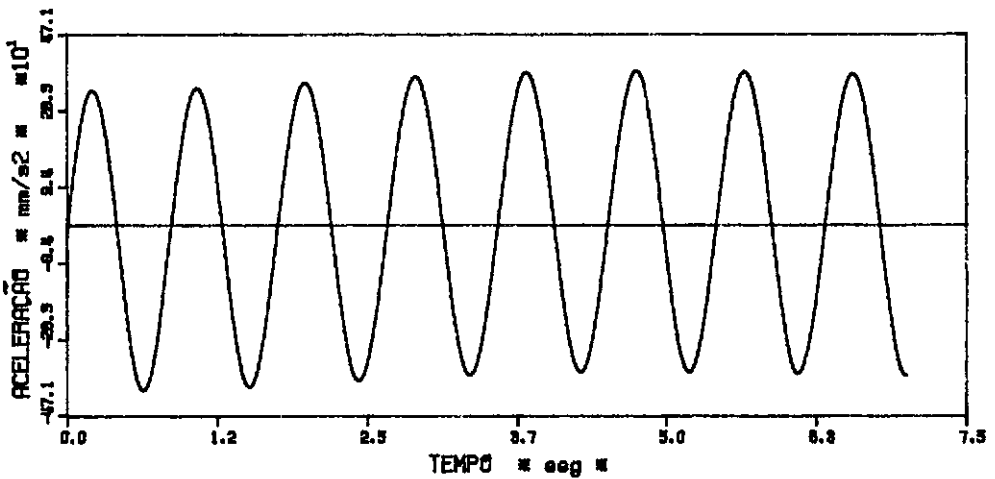
(C) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 4

FIGURA V.8 - Resposta no tempo da simulação numérica do modelo sob ação de ondas inclinadas de 30 graus com a direção surge.

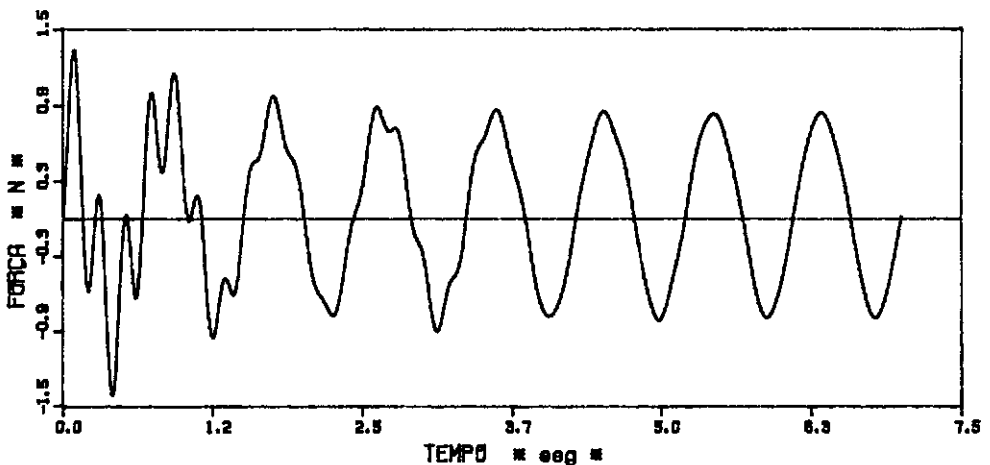
COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge

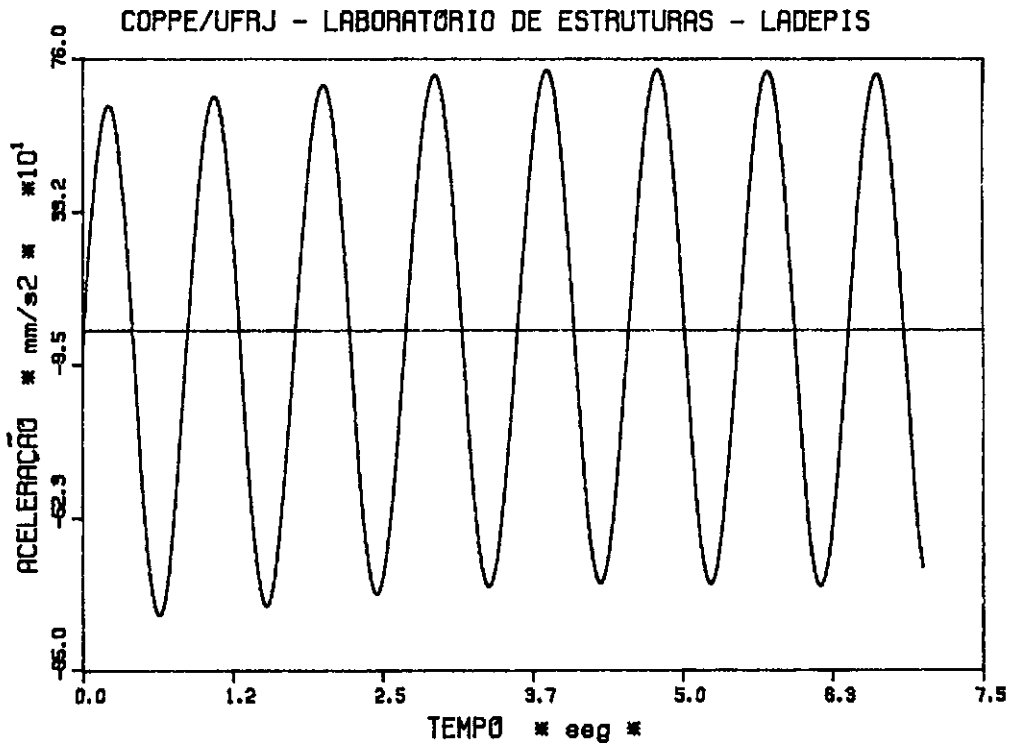


(B) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge

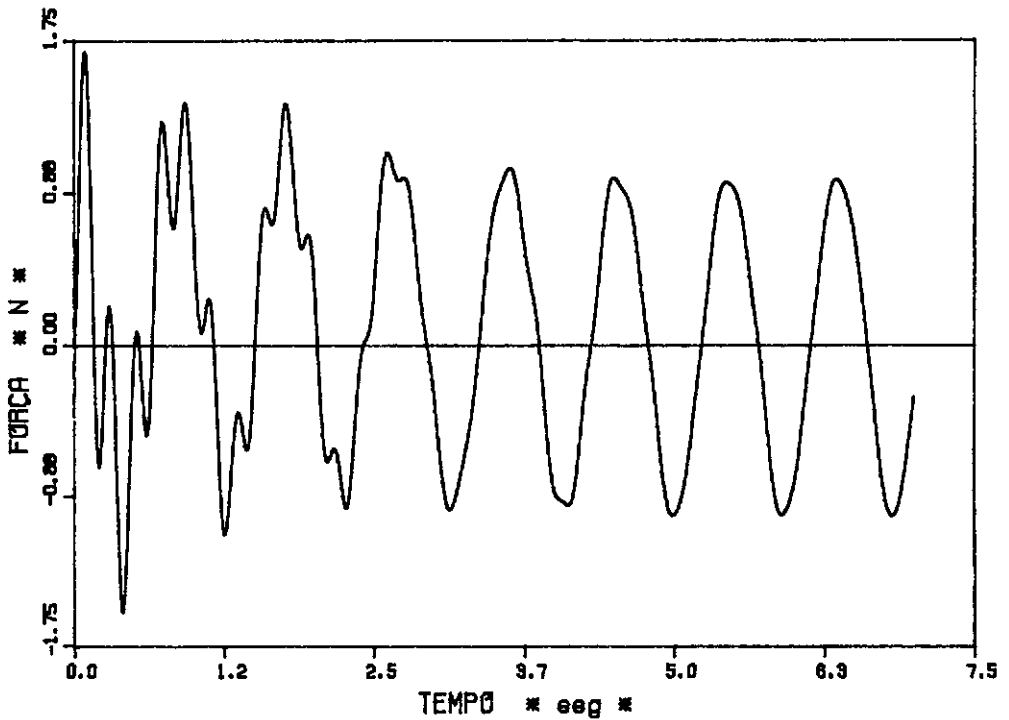


(C) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA V.9 - Resposta no tempo da simulação numérica do modelo sob ação de ondas inclinadas de 60 graus com a direção surge.



(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção sway



(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão I

FIGURA V.10 - Resposta no tempo da simulação numérica do modelo sob ação de ondas inclinadas de 90 graus com a direção surge.

CAPÍTULO VI

ANÁLISE DOS RESULTADOS

VI.1 - Análise dos Períodos Naturais

A tabela VI.1 mostra os períodos naturais obtidos nos ensaios experimentais e os obtidos com a análise numérica para o modelo e para o protótipo. Na primeira coluna temos os períodos obtidos com a análise numérica para o protótipo idealizado, e na segunda coluna temos os obtidos com a análise numérica para o modelo construído. Na terceira coluna são apresentados os resultados obtidos com os ensaios experimentais. Deve ser lembrado que os períodos referentes ao modelo foram extrapolados para o protótipo usando a equação II.5, para uma melhor comparação.

Tabela VI.1 - Períodos naturais obtidos nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas

MODOS DE VIBRAÇÃO	PERÍODOS NATURAIS (seg)		
	PROTÓTIPO NUMÉRICO	MODELO NUMÉRICO	MODELO EXPERIMENTAL
SWAY	113.42	105.76	116.08
SURGE	113.73	106.05	90.27
HEAVE	2.43	2.67	2.73
PITCH	2.02	2.77	2.90
ROLL	1.75	2.37	2.60
YAW	68.82	61.75	77.38

Analisando os períodos obtidos na tabela VI.1 podemos concluir que os resultados se apresentam muito

satisfatórios.

A pequena diferença entre os períodos obtidos para sway e surge nos ensaios experimentais pode ser explicada pela força restitutiva, que aumenta devido ao aumento do empuxo quando se excita o modo surge de vibração, o que não é considerado nos modelos numéricos.

As pequenas diferenças observadas entre os períodos obtidos com a simulação numérica do modelo construído e os resultados experimentais podem ser explicados pelas imperfeições do modelo experimental, ou seja, pela modelagem experimental da rigidez axial dos tendões e da sua distribuição de massa.

As diferenças encontradas nos períodos naturais obtidos através das simulações numéricas do modelo e do protótipo já foram explicadas na seção V.2.1.

VI.2 - Análise da Resposta no Tempo

A comparação dos resultados experimentais com os resultados da simulação numérica podem ser divididos em duas fases : análise dos resultados do modelo sob ação de impactos e análise dos resultados do modelo sob ação de ondas.

VI.2.1 - Modelo sob Ação de Impactos

Neste item, os resultados experimentais são comparados com os resultados numéricos obtidos da simulação dos impactos que foram medidos durante estes

ensaios experimentais, conforme pode ser visto no item III.2.

A figura VI.1 (A) mostra a comparação numérico-experimental da resposta no tempo da aceleração do modelo na direção sway quando este foi submetido a impactos excitando o modo sway de vibração. A figura VI.1 (B) apresenta a comparação da variação da força do tendão 1 para o mesmo impacto anterior. O acoplamento observado na figura VI.1 (B) pode ser explicado pela dificuldade de se excitar somente o modo sway de vibração, sendo sempre excitado também o modo roll.

Na figura VI.2 (A) pode ser observada a comparação da aceleração na direção surge devido ao impacto excitando o modo surge de vibração do modelo. Na figura VI.2 (B) temos a comparação da variação da força no tendão 1 para este mesmo impacto. Nestes resultados observa-se também um acoplamento na figura VI.2 (B), sendo desta vez com o modo pitch de vibração.

Os resultados da comparação do impacto excitando o modo heave de vibração podem ser vistos na figura VI.3, onde a figura VI.3 (A) mostra a aceleração na direção heave e a figura VI.3 (B) mostra a variação da força nos tendões. Na figura VI.3 pode ser observado um acoplamento, provavelmente devido aos modos pitch e roll, que são excitados simultaneamente com heave.

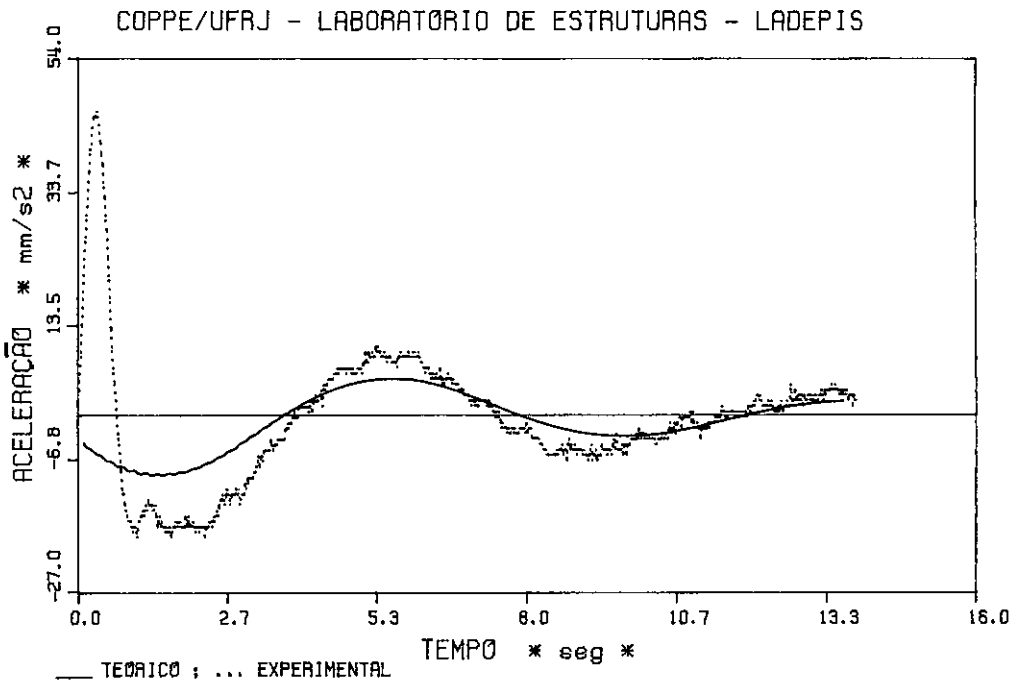
A figura VI.4 (A) mostra a comparação numérico-experimental da rotação do modelo quando foi dado impacto para excitar o modo pitch de vibração. A figura VI.4 (B) mostra a comparação da variação da força no

tendência 3 quando o modelo foi submetido ao mesmo impacto. Por estes resultados pode se notar um acoplamento, pelo mesmo motivo que foi afirmado anteriormente, que é muito difícil de se excitar somente o modo de vibração em questão.

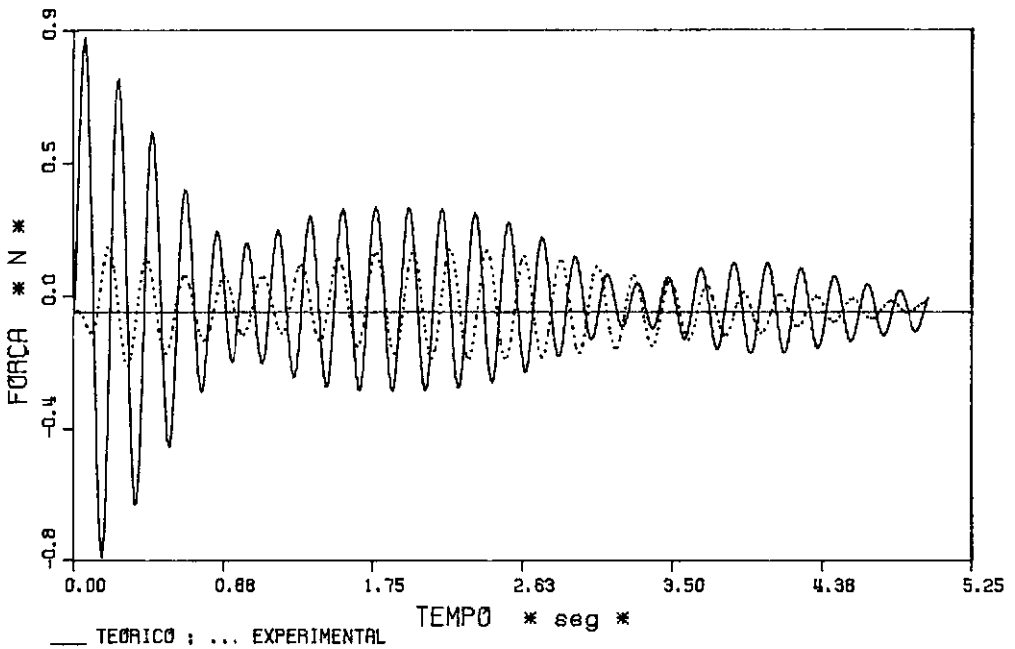
Na figura VI.5 (A) pode ser observada a comparação da rotação quando foi dado impacto para excitar o modo roll de vibração do modelo. A figura VI.5 (B) mostra a comparação da variação da força no tendão 4. O acoplamento continua presente nestes resultados, sendo que agora o modo roll está acoplado com o modo sway.

Na figura VI.6 pode ser vista a comparação dos resultados do impacto excitando o modo yaw de vibração. A comparação da rotação do modelo pode ser observada na figura VI.6 (A) enquanto que a comparação da variação da força no tendão 2 pode ser vista na figura VI.6 (B). A diferença no período experimental e numérico pode ser observada na figura VI.6 (A), e a figura VI.6 (B) mostra um acoplamento do modo yaw com outros modos.

Analisando os resultados das comparações podemos dizer que a simulação numérica para os impactos no modelo foi bastante satisfatória, confirmando assim o valor do coeficiente de inércia (C_M) igual a 2,0. As pequenas defasagens no tempo observadas nos resultados são devidas às diferenças entre os períodos experimentais e numéricos. As pequenas diferenças nas amplitudes dos sinais podem ser explicadas pela simulação dos impactos, onde não foi considerada a sua inclinação na hora do impacto, fator que influencia muito na amplitude da resposta.

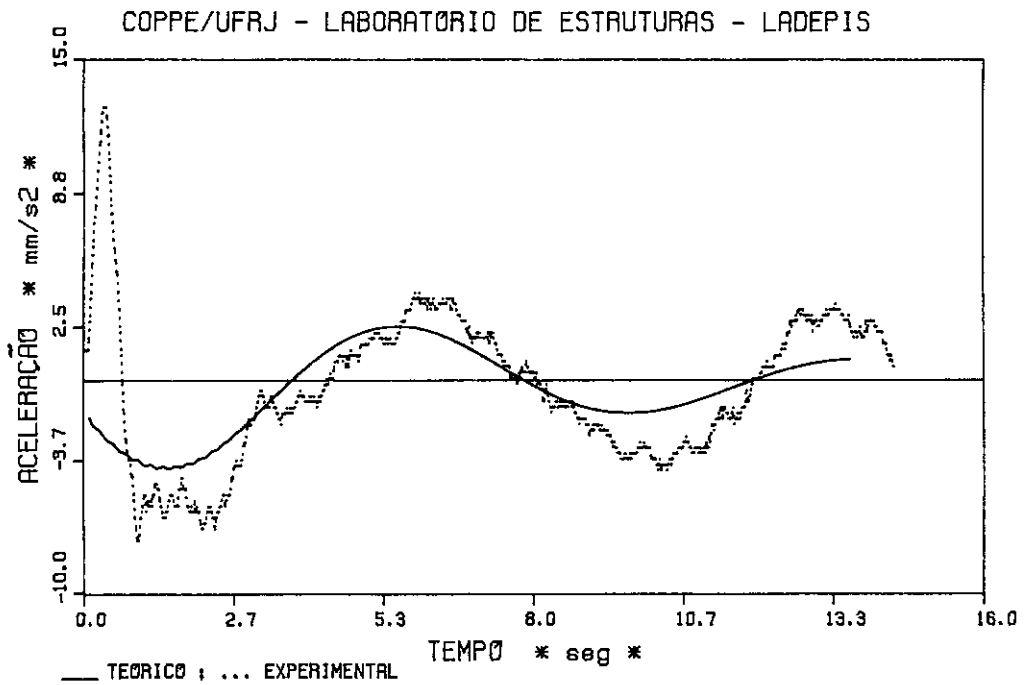


(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção sway (ACX)

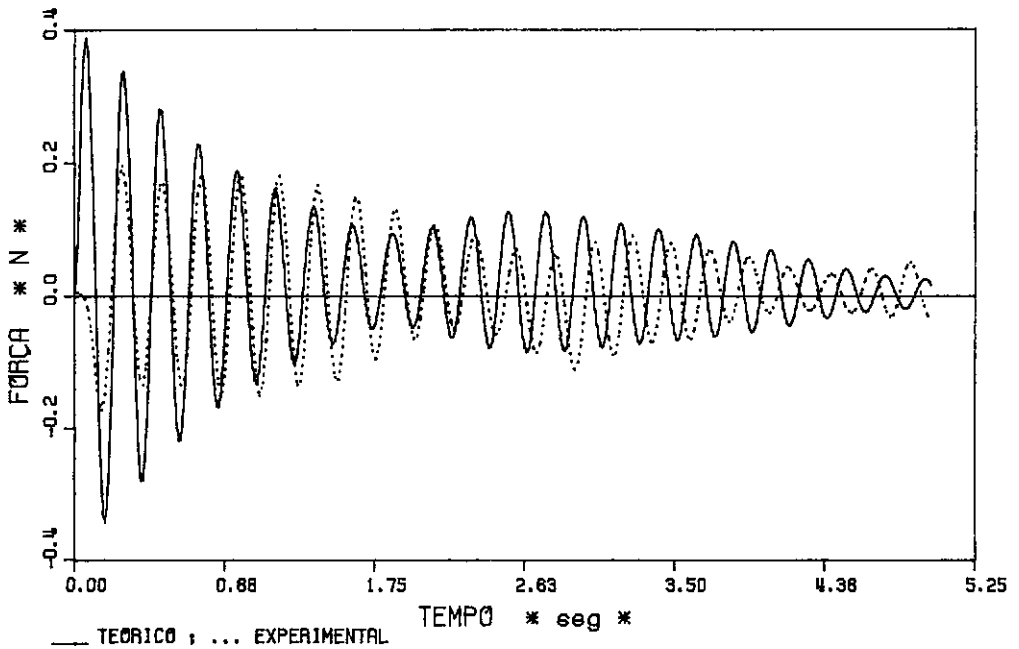


(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1

FIGURA VI.1 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de impactos excitando o modo sway.

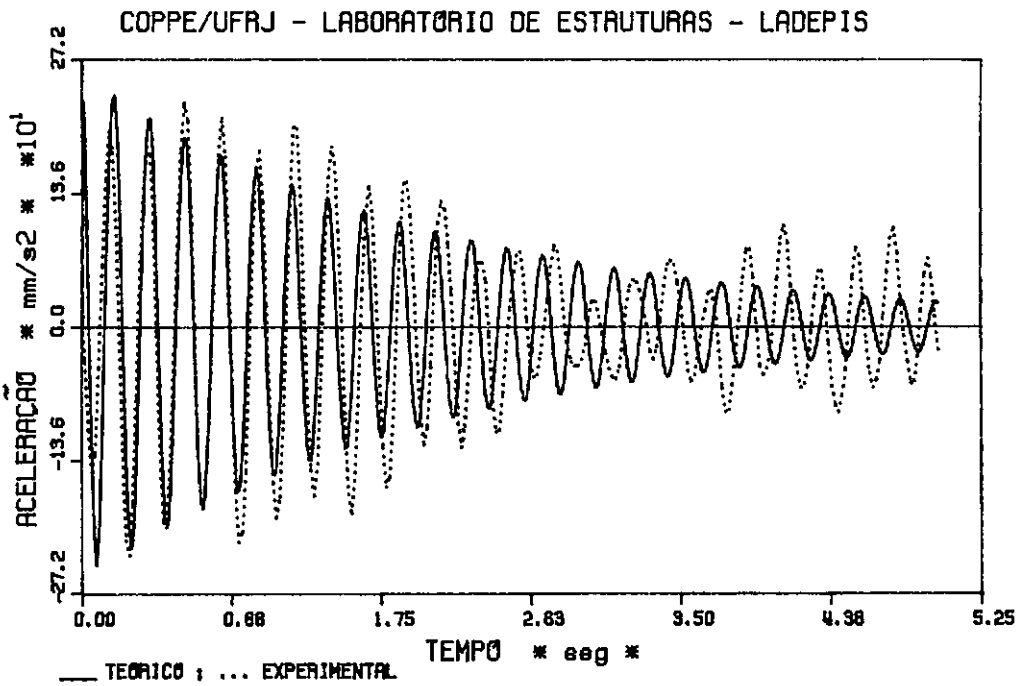


(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção eurge (ACY1)

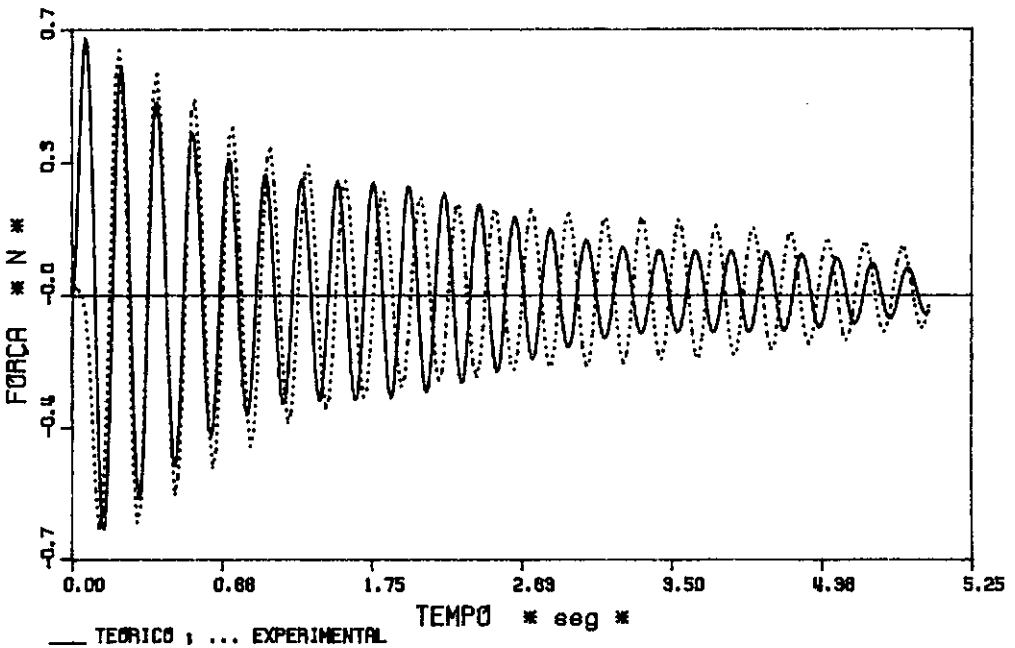


(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1

FIGURA VI.2 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de impactos excitando o modo surge.

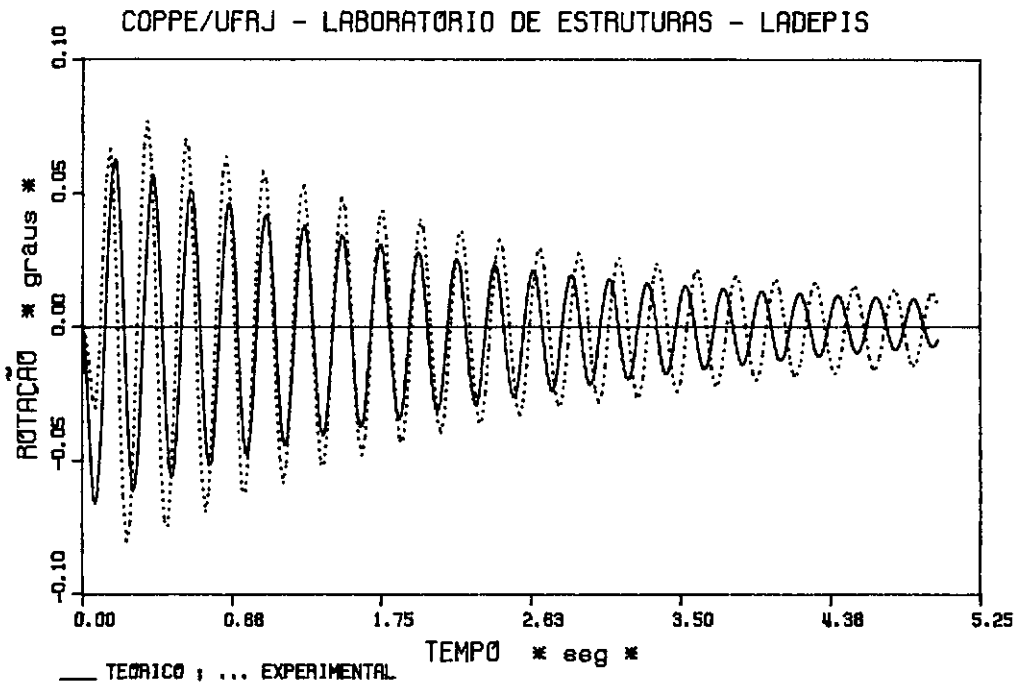


(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção heave (ACZ1)

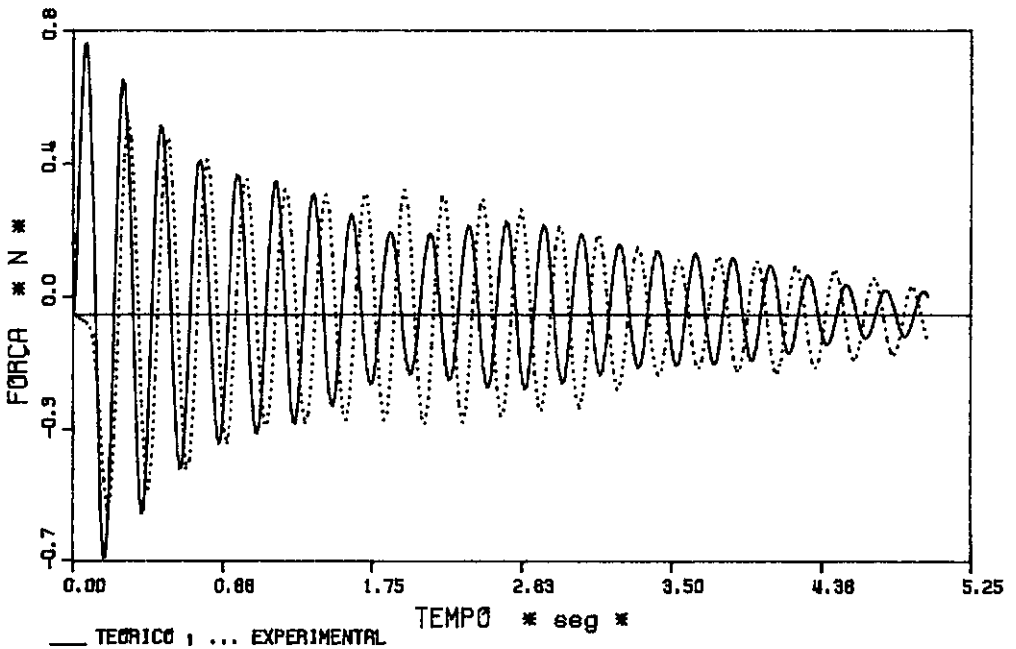


(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 3

FIGURA VI.3 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de impactos excitando o modo heave.

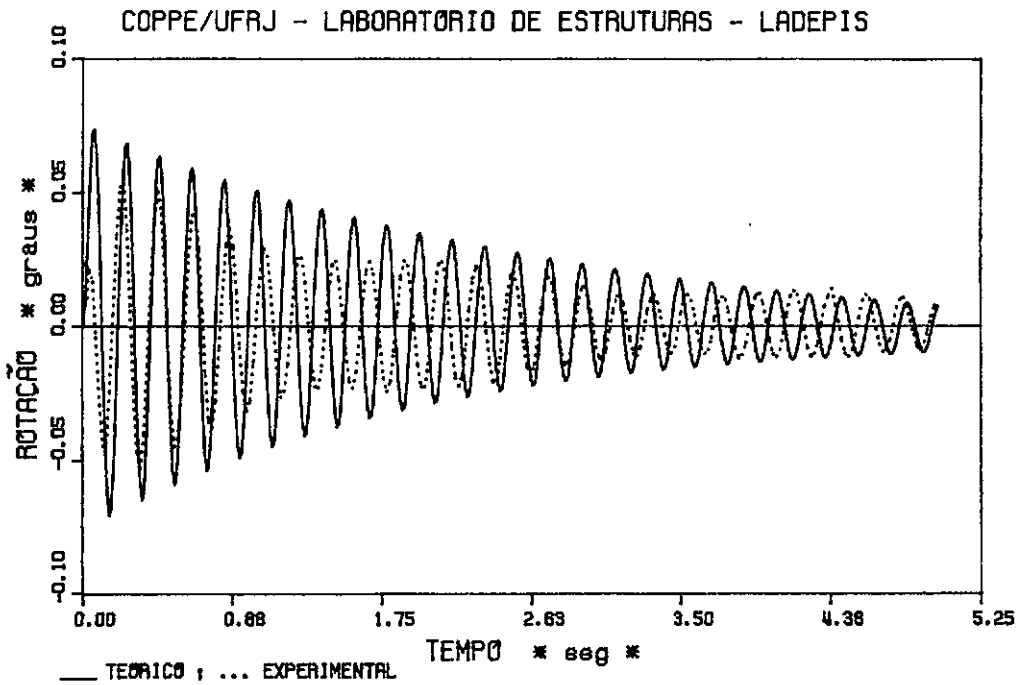


(A) - Resposta no tempo da rotação na direção pitch

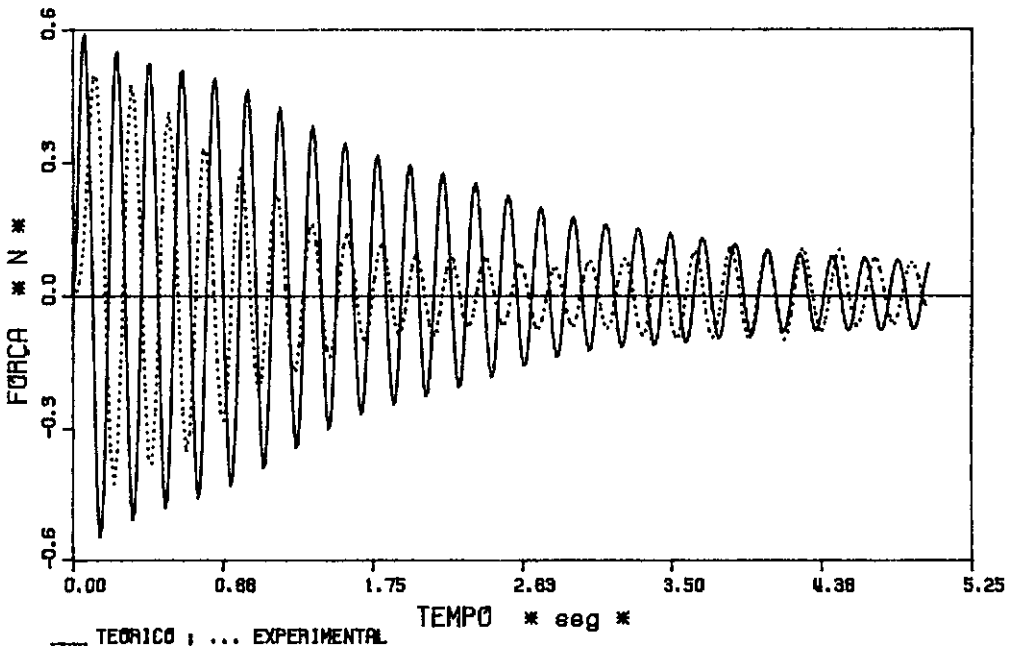


(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA VI.4 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de impactos excitando o modo pitch.



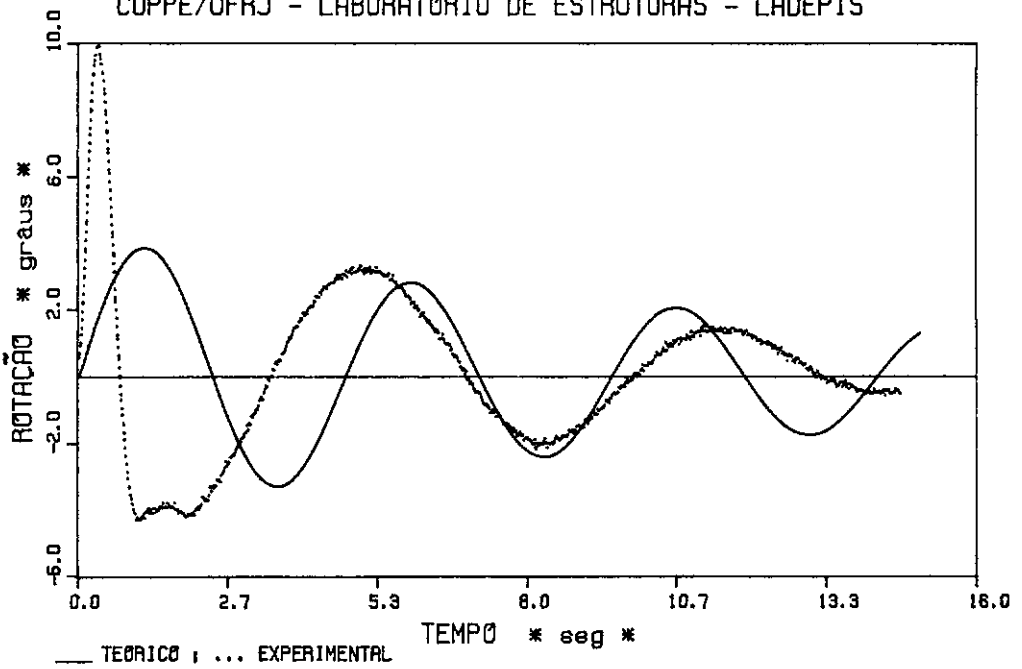
(A) - Resposta no tempo da rotação na direção roll



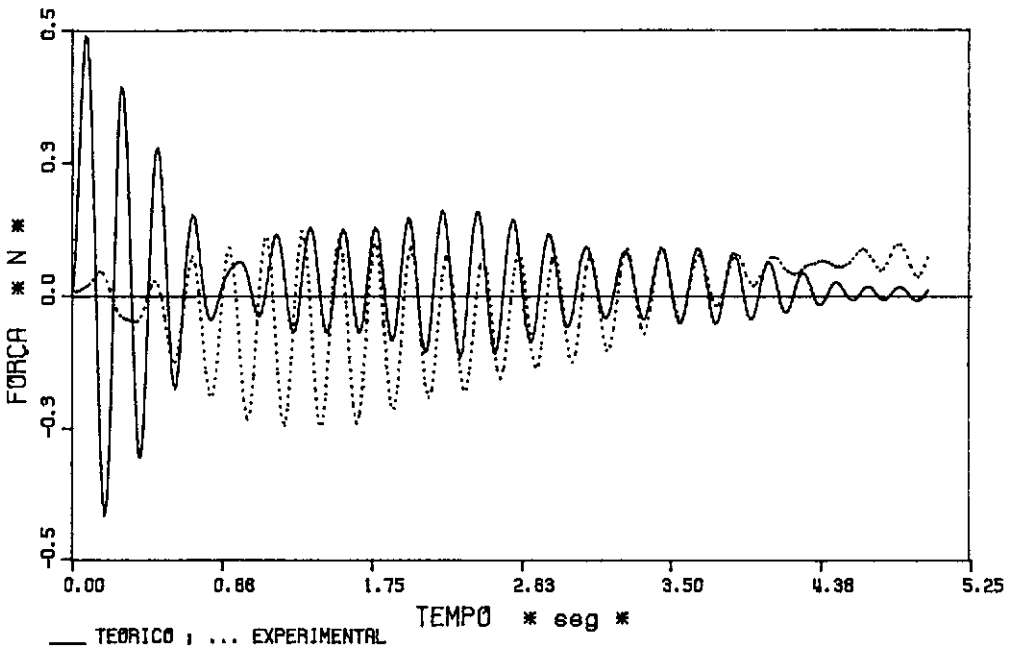
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 4

FIGURA VI.5 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de impactos excitando o modo roll.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



(A) - Resposta no tempo da rotação na direção yaw



(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA VI.6 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de impactos excitando o modo yaw.

VI.2 - Modelo sob Ação de Ondas

Neste item são apresentados os resultados das comparações entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas para o caso do modelo submetido à ação de ondas. Para a simulação numérica, as ondas foram consideradas perfeitamente harmônicas, com altura de onda e período obtidos dos ensaios experimentais.

Nas figuras VI.7 e VI.8 são apresentadas as comparações entre os resultados obtidos experimental e numericamente para o modelo sob ação de ondas inclinadas de 0° com a direção surge. A figura VI.7 (A) mostra a comparação da aceleração do modelo na direção da onda, enquanto que as figuras VI.7 (B) e (C) e VI.8 (A) e (B) mostram as comparações da variação da força nos tendões 1, 2, 3 e 4 respectivamente. A figura IV.34, apresentada no capítulo IV, permite uma melhor observação dos resultados destes ensaios.

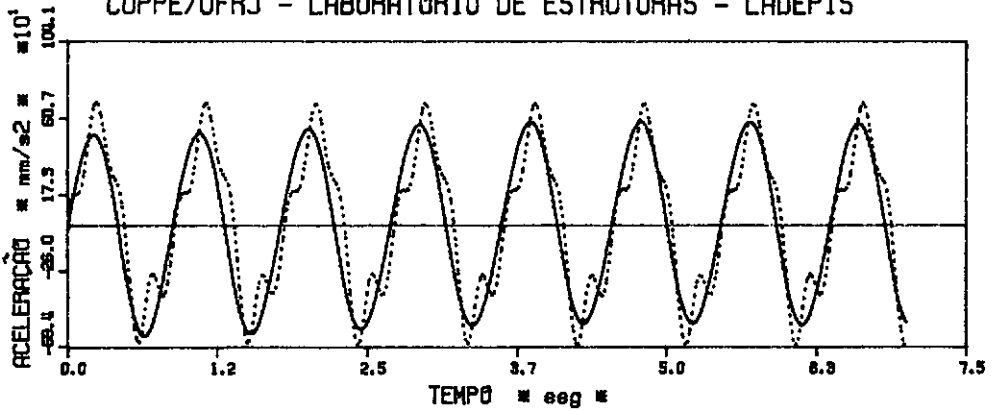
As figuras VI.9, VI.10 e VI.11 apresentam os resultados das comparações para o modelo submetido à ação de ondas inclinadas de 30° com a direção surge. A figura VI.9 (A) mostra a comparação da aceleração na direção sway e a figura VI.9 (B) mostra a comparação da aceleração na direção surge. As figuras VI.10 (A) e (B) e VI.11 (A) e (B) mostram as comparações da variação da força nos tendões 1, 2, 3 e 4 respectivamente. Na figura IV.43, pode ser observada a incidência das ondas sobre o modelo nestes ensaios.

Os resultados das comparações para os ensaios do

modelo submetido à ação de ondas inclinadas de 60° com a direção surge são apresentados nas figuras VI.12, VI.13 e VI.14. Na figura VI.12 (A) é mostrada a comparação da aceleração do modelo na direção sway e na figura VI.12 (B) temos a comparação da aceleração na direção surge. As figuras VI.13 (A) e (B) e VI.14 (A) e (B) mostram as comparações da variação da força nos tendões 1, 2, 3 e 4. A figura IV.53 ilustra os ensaios com ondas inclinadas de 60° com a direção surge.

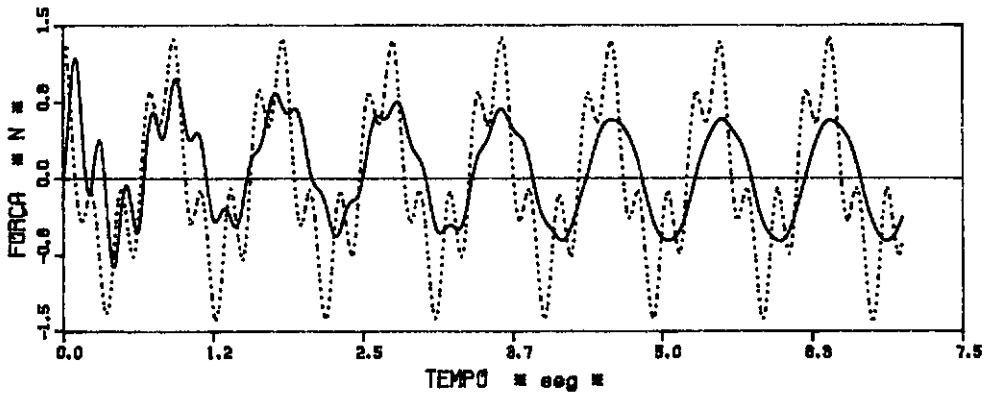
As figuras VI.15 e VI.16 correspondem às comparações dos resultados obtidos nos ensaios de ondas incidindo em 90° com a direção surge. A figura IV.63 permite observar a incidência das ondas sobre o modelo. A figura VI.15 (A) mostra a comparação da aceleração do modelo na direção sway, enquanto que as figuras VI.15 (B) e (C) e VI.16 (A) e (B) mostram as comparações da variação da força nos tendões 1, 2, 3 e 4.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS



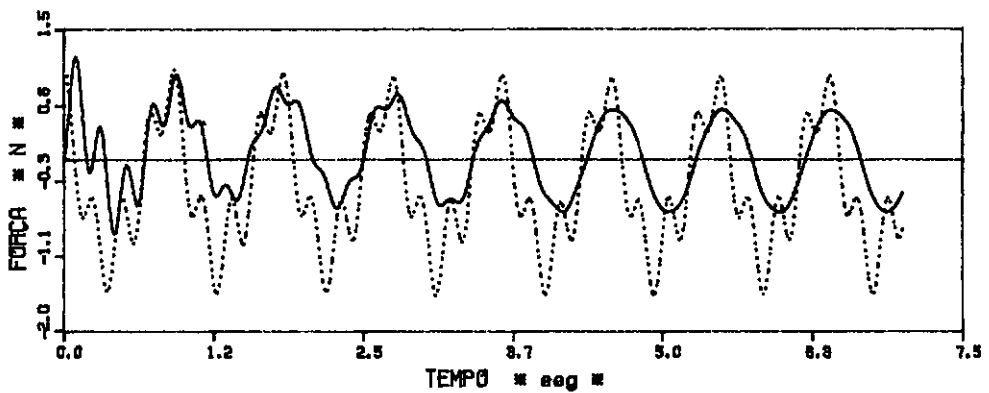
— TEÓRICO ; ... EXPERIMENTAL

(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge (ACY1)



— TEÓRICO ; ... EXPERIMENTAL

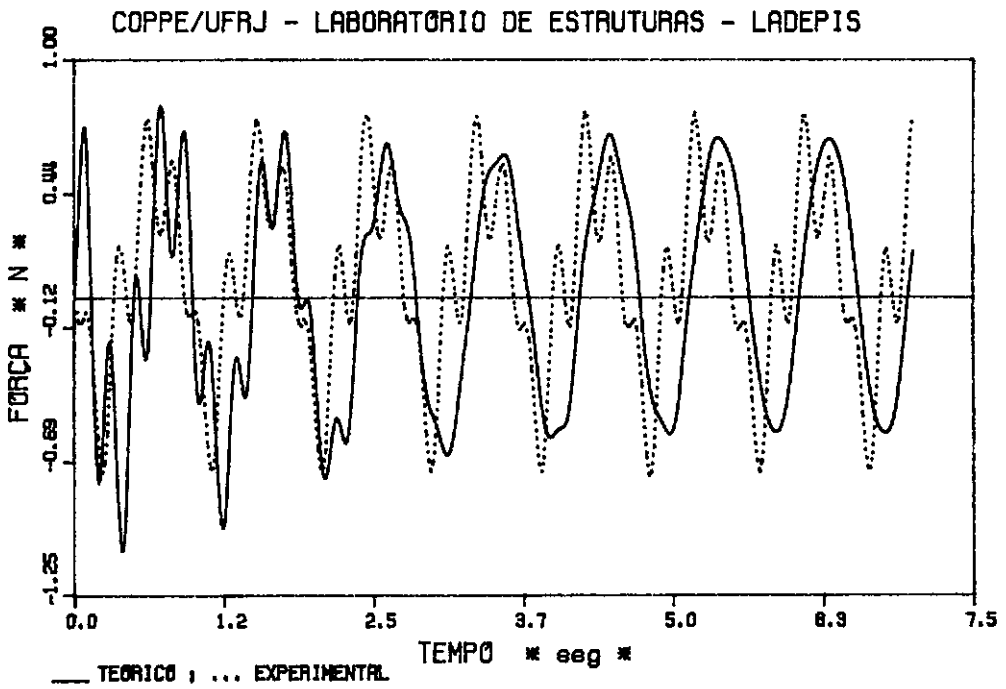
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1



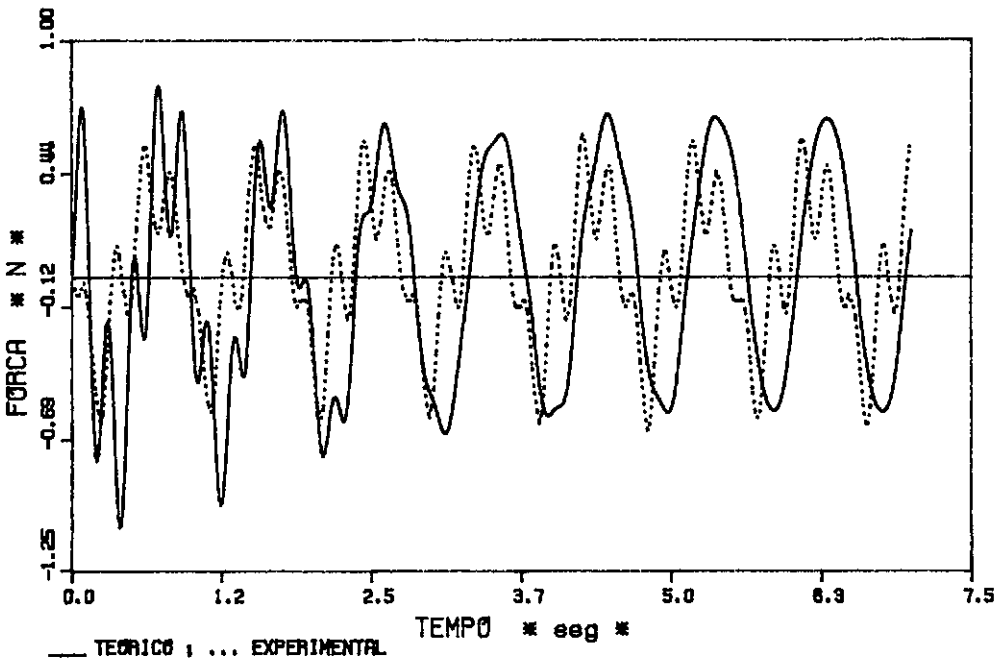
— TEÓRICO ; ... EXPERIMENTAL

(C) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA VI.7 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de ondas inclinadas de 0 graus com a direção surge.



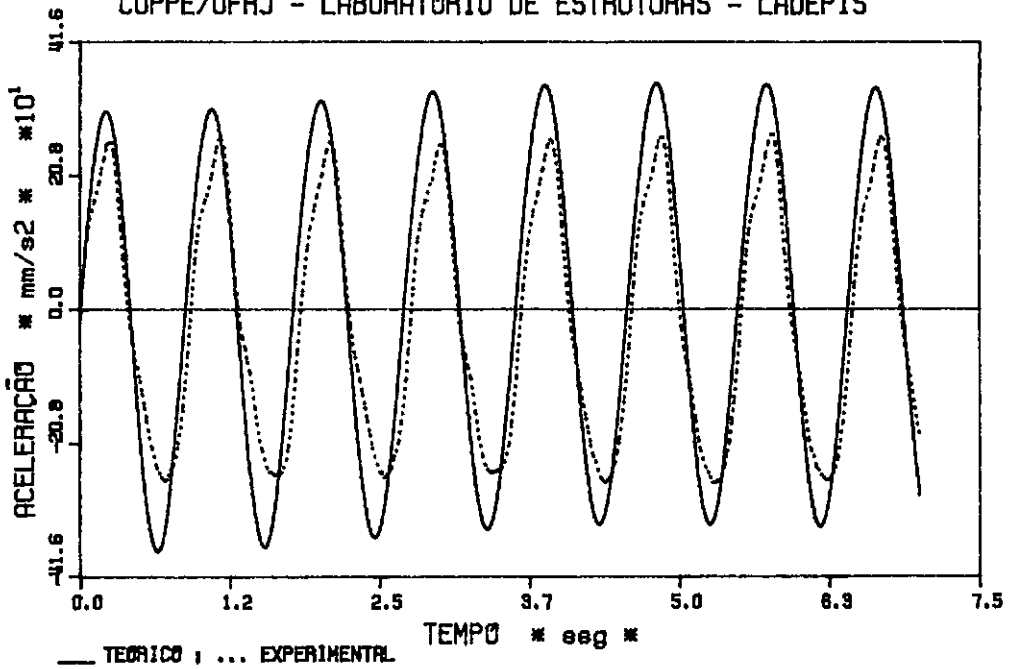
(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 3



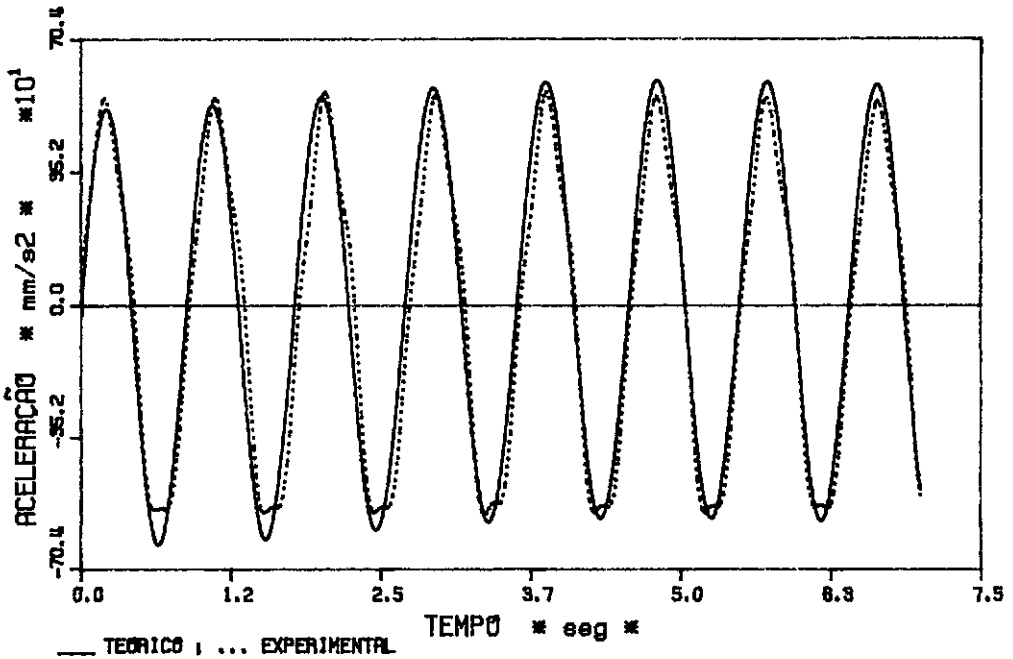
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 4

FIGURA VI.8 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de ondas inclinadas de 0 graus com a direção surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS

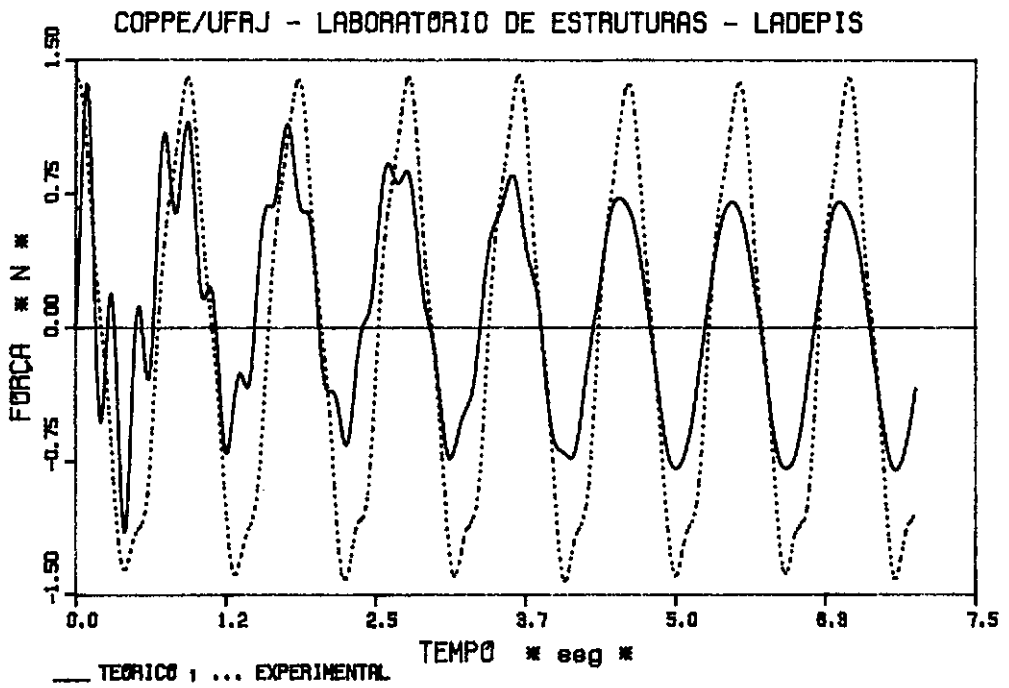


(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção sway (ACX)

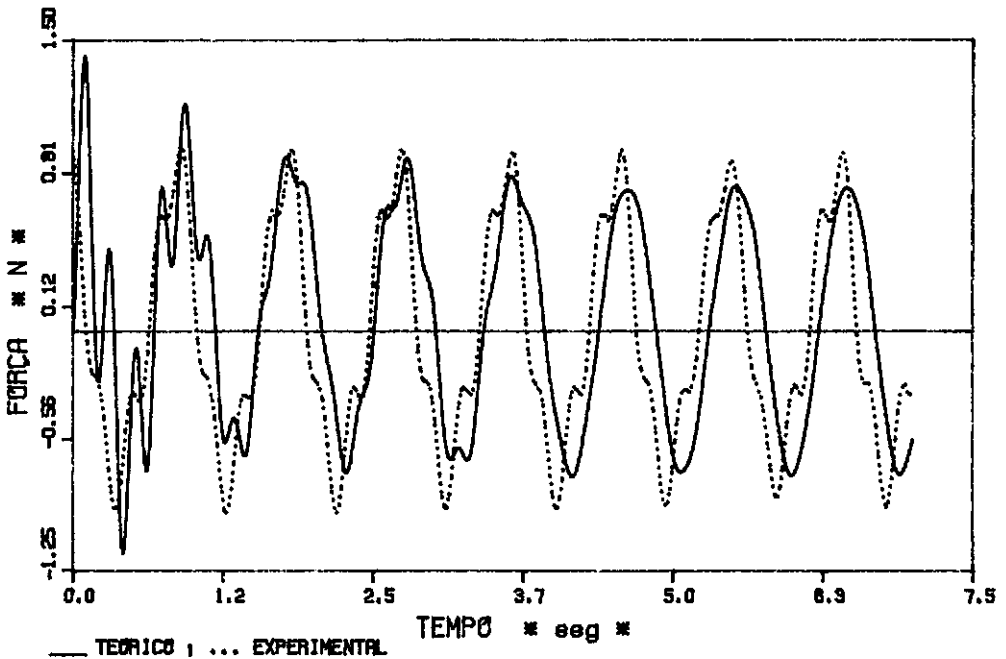


(B) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge (ACY)

FIGURA VI.9 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de ondas inclinadas de 30 graus com a direção surge.



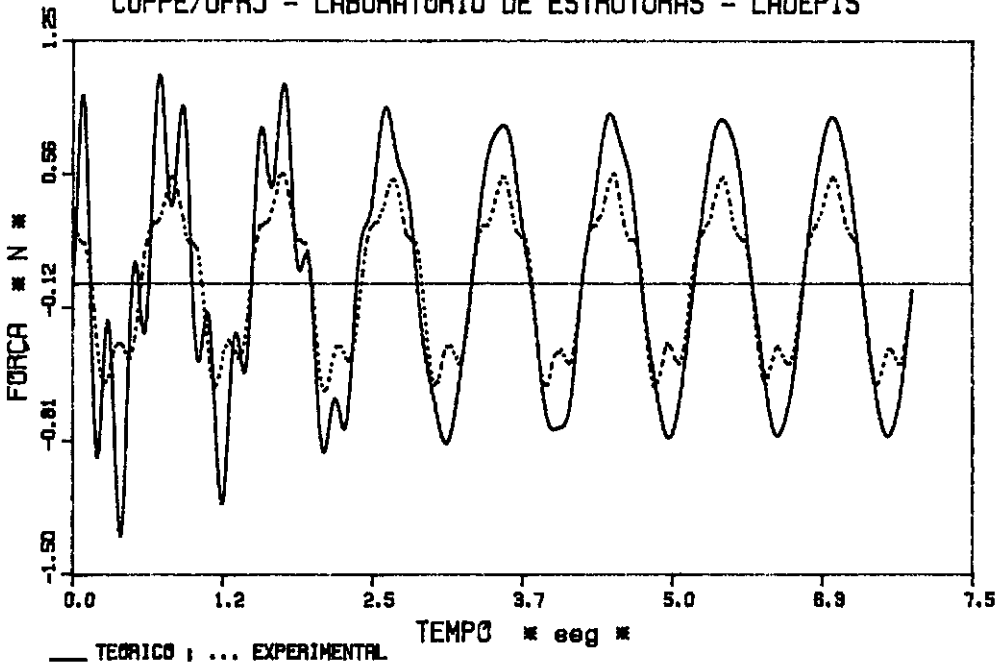
(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1



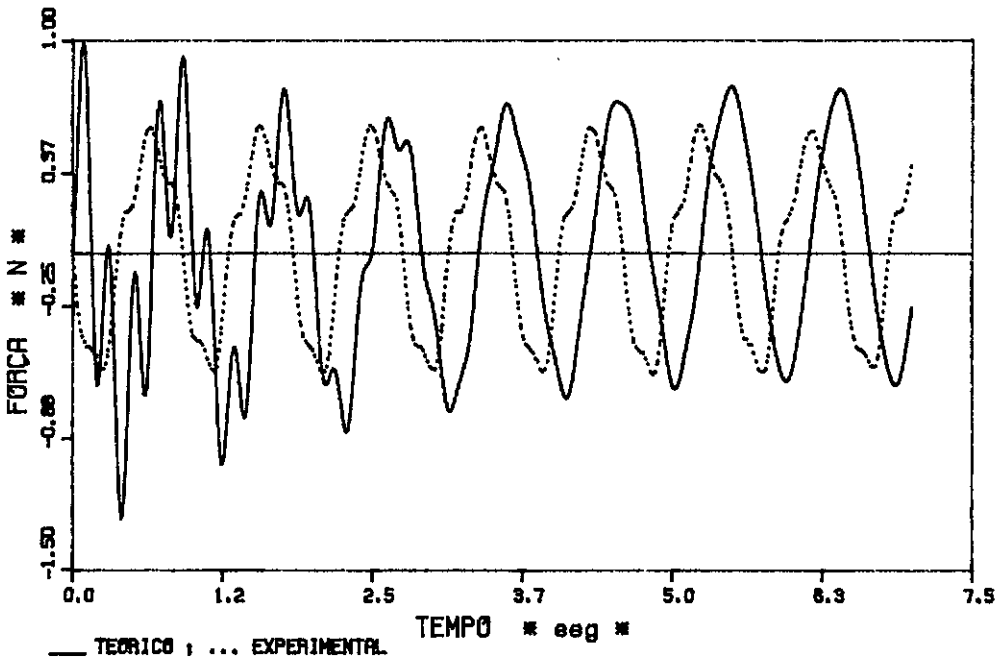
(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA VI.10 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de ondas inclinadas de 30 graus com a direção surge.

COPPE/UFRJ - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS - LADEPIS

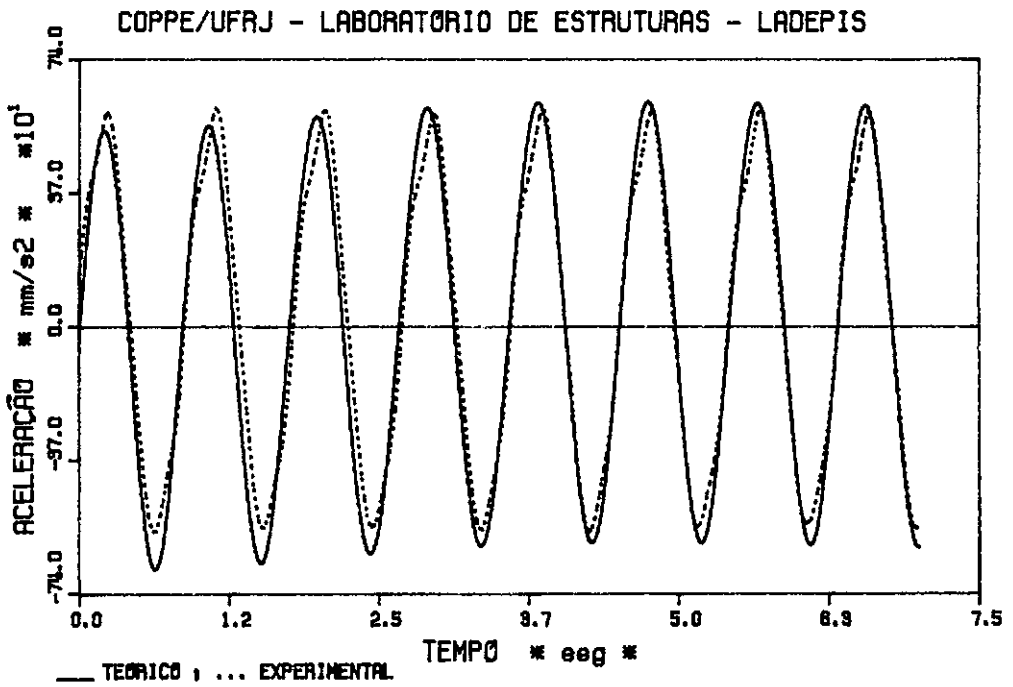


(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 3

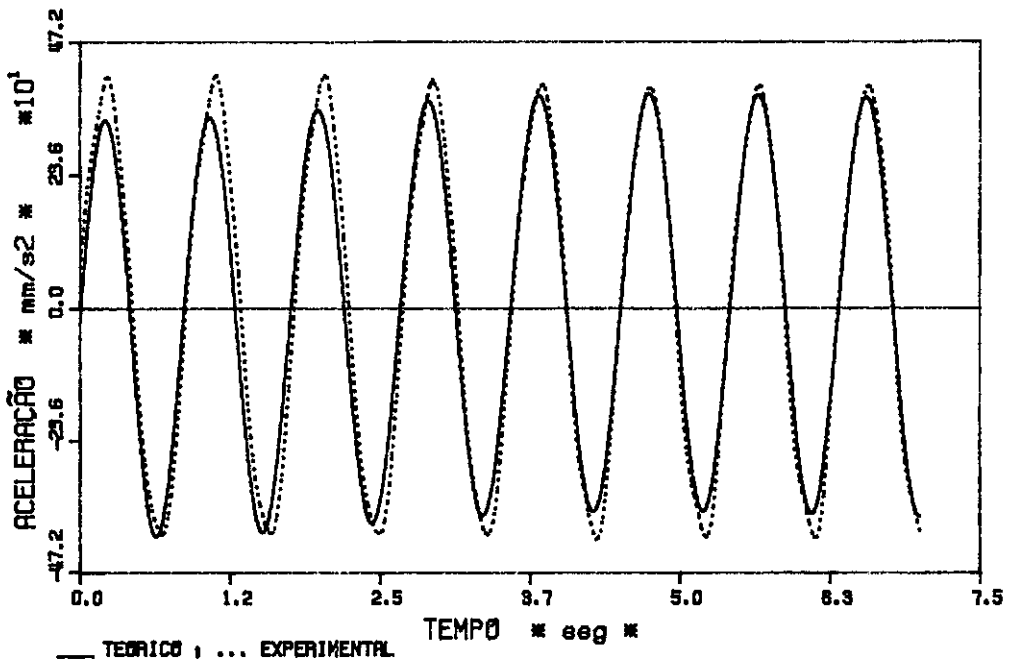


(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 4

FIGURA VI.11 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de ondas inclinadas de 30 graus com a direção surge.

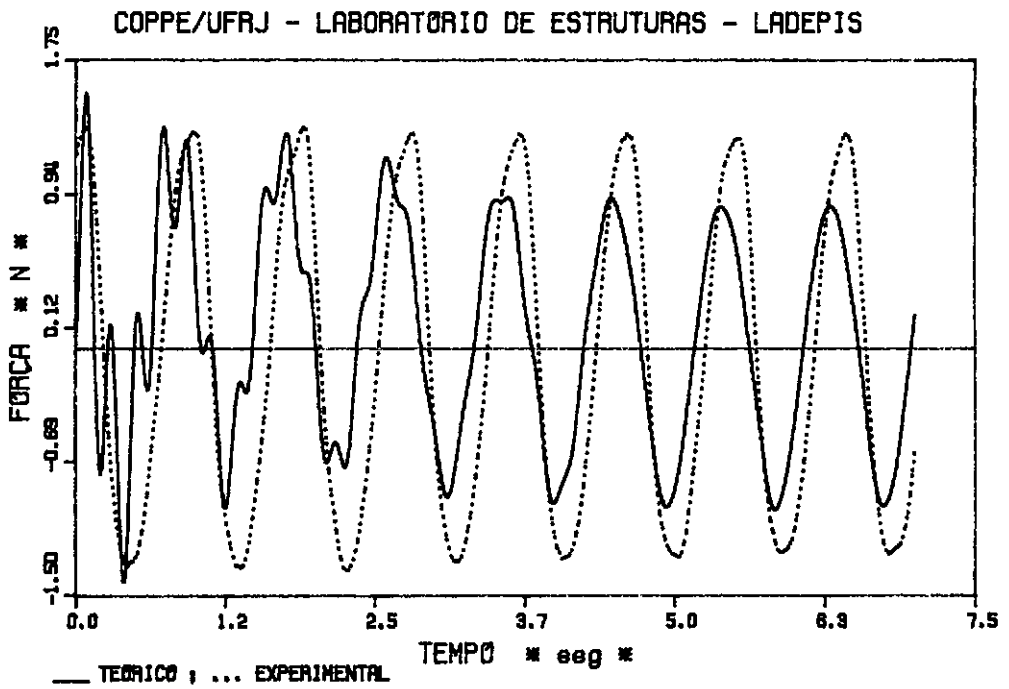


(A) - Resposta no tempo da aceleração na direção sway (ACX)

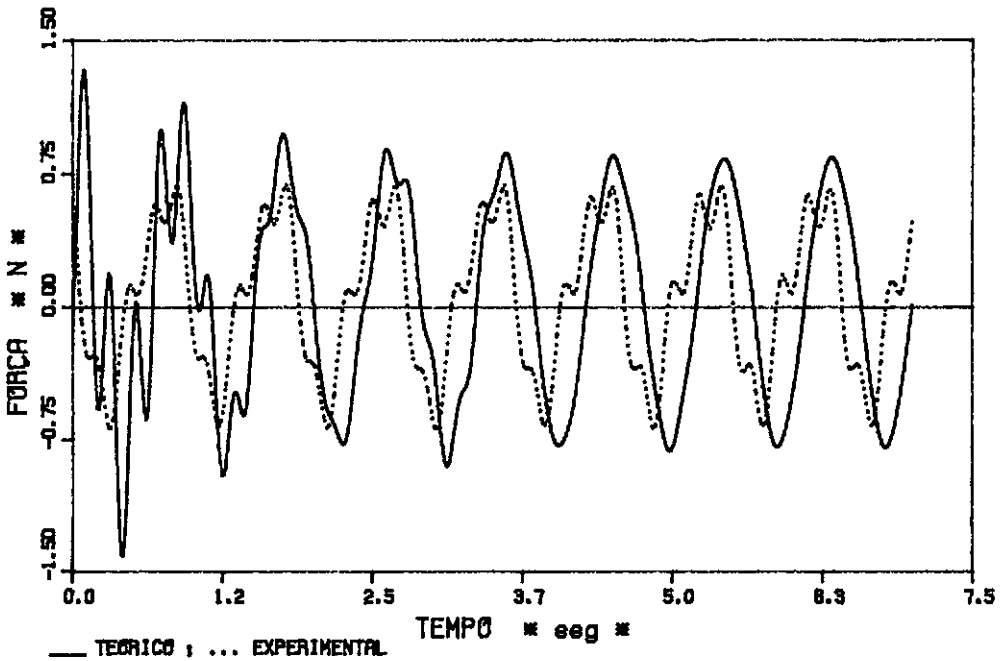


(B) - Resposta no tempo da aceleração na direção surge (ACY1)

FIGURA VI.12 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de ondas inclinadas de 60 graus com a direção surge.

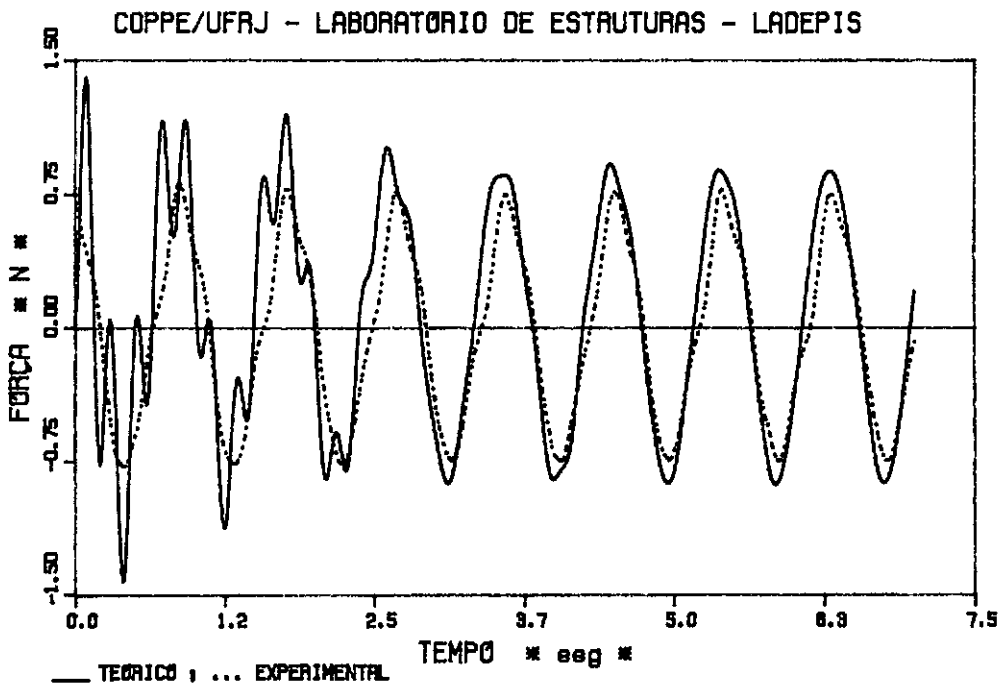


(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1

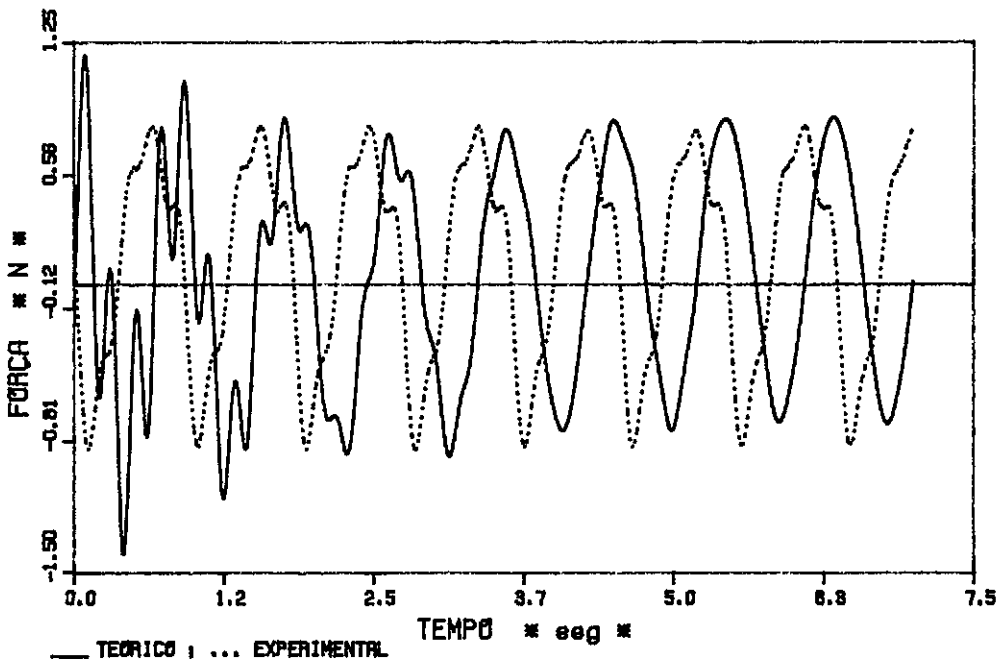


(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA VI.13 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de ondas inclinadas de 60 graus com a direção surge.

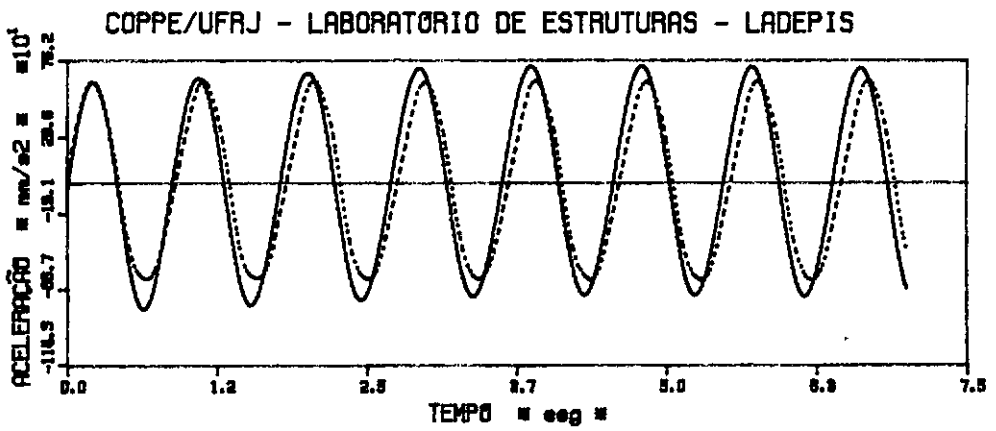


(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 3

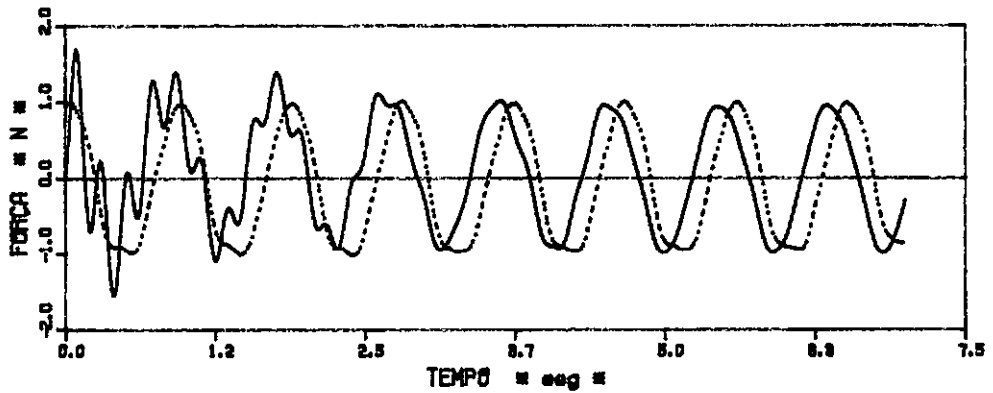


(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 4

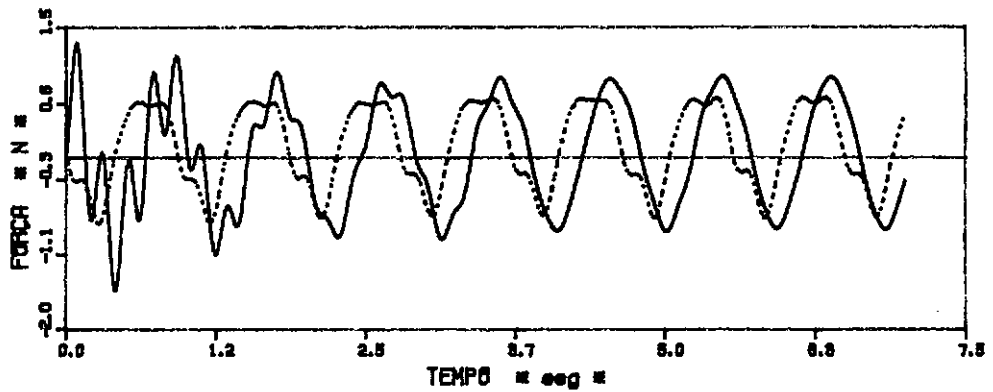
FIGURA VI.14 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de ondas inclinadas de 60 graus com a direção surge.



(A) - Resposta no tempo de aceleração na direção sway (ACX)

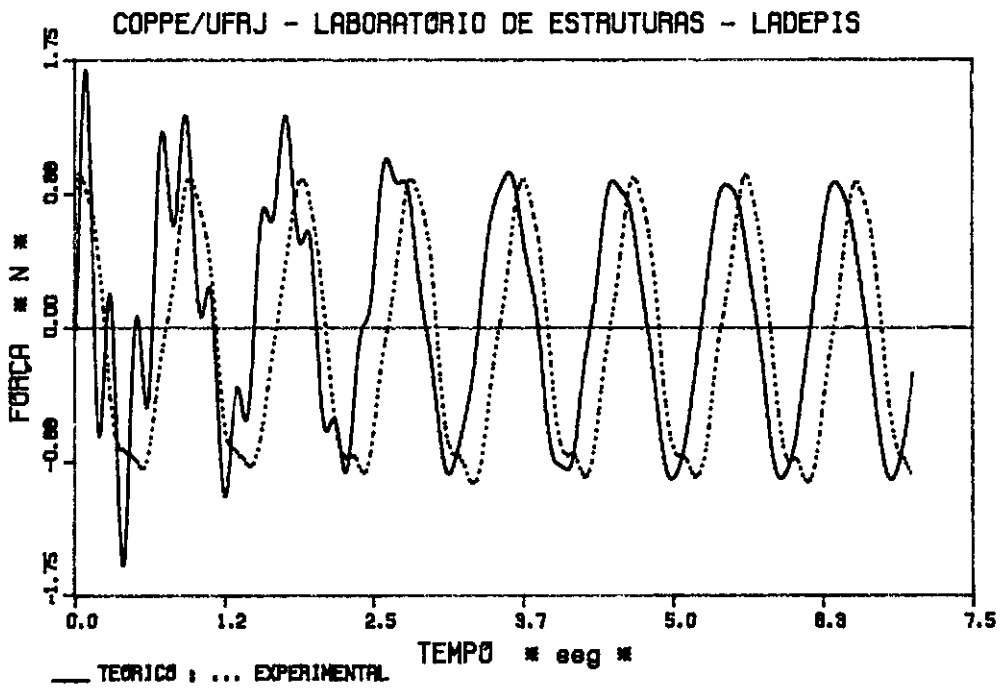


(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 1

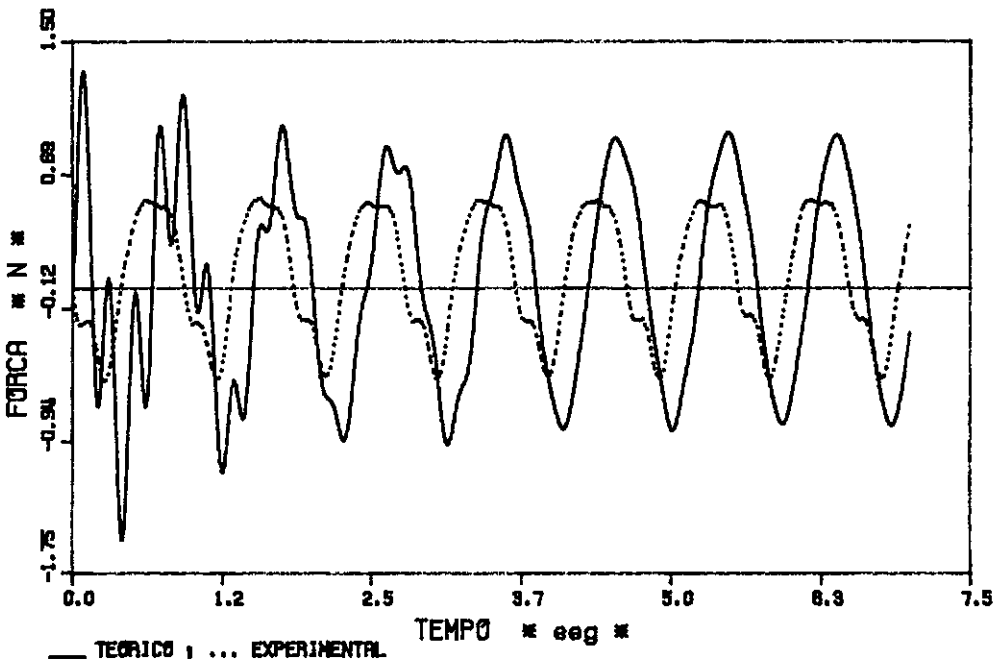


(C) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 2

FIGURA VI.15 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de ondas inclinadas de 90 graus com a direção surge.



(A) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 3



(B) - Resposta no tempo da variação da força no tendão 4

FIGURA VI.16 - Comparação numérico-experimental da resposta no tempo do modelo sob ação de ondas inclinadas de 90 graus com a direção surge.

A partir dos resultados das comparações das acelerações numérico-experimentais dos ensaios sob a ação de ondas com diversos ângulos de incidência, podemos concluir que a simulação numérica utilizada foi bastante eficiente, já que os resultados numéricos e experimentais foram praticamente idênticos para todos os ângulos de incidência de onda (ver figuras VI.7 (A), VI.9, VI.12 e VI.15 (A)).

Desta forma, os valores adotados para o coeficiente de inércia (C_M) igual a 2,0 e para o coeficiente de arrasto (C_D) igual a 0,49 para as colunas e 1,37 para os flutuadores, obtidos de fórmulas [7] em função das dimensões das colunas e dos flutuadores, podem ser utilizados para protótipos de TLP com características similares ao modelo construído.

Observando os resultados das comparações numérico-experimentais das variações das forças dos tendões nos ensaios sob a ação de ondas, podemos chegar a conclusões sobre a simulação numérica, baseado nas diferenças obtidas nestas comparações. A principal diferença observada nas comparações foi o aumento da amplitude da resposta da força dos tendões nos ensaios experimentais, sobre os quais as ondas não incidiram diretamente. Este aumento não ocorreu nas simulações numéricas, como fica evidenciado nas figuras VI.7 (B) e (C), VI.10 e VI.13 (A). Este fato ocorreu para os ensaios sob ondas inclinadas em 0° , 30° e 60° , onde o acoplamento da frequência de excitação da onda com o superharmônico da onda na frequência de excitação do modo pitch (ver figuras

IV.39, IV.40, IV.49 e IV.59) gerou uma amplificação dinâmica da força para os tendões posteriores à incidência da onda, aumentando em até 100 % o valor da variação máxima da força nestes tendões. Este aumento não aparece na simulação numérica já que o programa utilizado não leva em consideração a variação do empuxo ocasionada por efeitos de movimentos de segunda ordem. Foi observada também uma pequena defasagem no tempo da resposta de alguns tendões nos ensaios experimentais, novamente não sendo esta defasagem considerada na simulação numérica.

A tabela VI.2 mostra um estudo comparativo da variação máxima da força dos tendões, quando o modelo foi submetido às diversas inclinações de ondas.

Tabela VI.2 - Variação máxima da força nos tendões para os diversos ensaios sob a ação de ondas.

ONDA		VARIAÇÃO MÁXIMA DA FORÇA (N)			
		TENDÃO 1	TENDÃO 2	TENDÃO 3	TENDÃO 4
0°	EXPERIM	1.375	1.301	0.750	0.587
	NUMÉRICO	0.595	0.599	0.607	0.622
30°	EXPERIM	1.388	0.942	0.555	0.576
	NUMÉRICO	0.751	0.744	0.814	0.689
60°	EXPERIM	1.348	0.682	0.797	0.811
	NUMÉRICO	0.918	0.819	0.874	0.788
90°	EXPERIM	0.971	0.710	0.938	0.556
	NUMÉRICO	0.967	0.880	0.967	0.888

Os resultados experimentais da tabela VI.2 mostram que as variações máximas dos tendões posteriores à incidência da onda são praticamente o dobro dessas mesmas variações nos tendões que recebem a onda de frente, para todos os casos de ângulo de incidência da onda, exceto para 90°. Estes resultados são de extrema importância para

o dimensionamento e para a verificação da fadiga dos tendões.

Foi realizado então um estudo preliminar da fadiga dos tendões da TLP para as condições da costa brasileira, considerando-se os dados de onda para fadiga na abordagem determinística da especificação de dados meteo-oceanográficos da bacia de Campos, [11]. Esta análise foi realizada utilizando os valores das variações máximas da força nos tendões obtidos através do modelo numérico ajustado com resultados experimentais e extrapolando, pela teoria da semelhança (equação II.3), para o protótipo. Foi adotado um fator de amplificação dinâmica igual a 2,0 para os tendões posteriores à incidência das ondas. A consideração utilizada foi baseada em teorias empíricas sugeridas para o cálculo de tensões de fadiga [7], considerando-se a tensão média a que os tendões estão submetidos, a variação cíclica das tensões nos tendões, as tensões características do aço, e utilizando-se de uma curva empírica (curva S-N) para achar o número de ciclos que resistirá quando submetida à tensão determinada. Fazendo esta análise foi comprovada a resistência à fadiga dos tendões para o uso na costa brasileira.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

São apresentadas a seguir as principais conclusões relativas à pesquisa realizada, analisando os resultados experimentais dos ensaios e comparando com os resultados das simulações numéricas:

- a. Como os períodos naturais dos 6 primeiros modos de vibração do modelo obtidos experimentalmente e numericamente são bastante próximos daqueles obtidos numericamente para o protótipo, pode-se garantir que as técnicas utilizadas no projeto, construção e obtenção de resultados experimentais são bastante confiáveis, mesmo nos casos em que os modelos são construídos em escalas geométricas bastante reduzidas.
- b. Através da comparação entre resultados experimentais e numéricos da resposta no tempo do modelo reduzido submetido a impactos ou sob a ação de ondas, pode-se concluir que a simulação numérica dos efeitos da interação fluido-estrutura foi realizada de forma adequada.
- c. Através da boa correlação obtida entre resultados experimentais e numéricos, pode-se afirmar que os valores adotados para o Coeficiente de Inércia, C_M , (igual a 2,0) e para o Coeficiente de Arrasto, C_D , (igual a 0,49 para as colunas e 1,37 para os flutuadores) podem ser utilizados para protótipos com características similares ao modelo.

- d. As taxas de amortecimento modais obtidas experimentalmente para o modelo reduzido podem ser usados diretamente para protótipos similares, pois além da taxa de amortecimento ser um parâmetro adimensional, ela é expressa em função de valores também adimensionais, i.e., pela razão do deslocamento da estrutura pelo diâmetro das suas colunas. Com isso, a taxa de amortecimento, que é um valor empírico devido à sua dificuldade de determinação, pode ser de grande valor na verificação e projeto de protótipos de TLP.
- e. De acordo com o estudo feito para verificar a influência da distribuição da massa do convés, chega-se à conclusão que os períodos não variam quantitativamente à variação dessa distribuição.
- f. Analisando os resultados numéricos e experimentais para a força dinâmica nos tendões, pode-se chegar à conclusão que é necessário que o programa leve em consideração o efeito de grupo existente, o que provoca uma amplificação dinâmica considerável nessa força. Isto se torna muito importante para o correto dimensionamento e verificação da fadiga dos tendões.
- g. Quanto à análise da fadiga, pode-se concluir que a TLP em questão, mesmo considerando a força nos tendões aumentadas em duas vezes devido à amplificação dinâmica citada no item f, apresenta uma vida útil satisfatória, sem apresentar quaisquer problemas de fadiga.
- h. Deve ainda ser ressaltada a importância da construção de modelos reduzidos para determinação de parâmetros

experimentais e para aferições numéricas de programas utilizados no projeto e verificação do comportamento de protótipos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FREIRE, A.C.G., "Estudo do Comportamento Dinâmico de Plataforma Offshore do Tipo T.L.P. para Águas Profundas Através de Modelo Reduzido Hidroelástico", tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1988.
- [2] ELLWANGER, G.B., EBECKEN, N.F.F., LIMA, E.P.C., JACOB, B.P. e COELHO, L., "Estudos Preliminares do Comportamento Global de uma T.L.P. de Seis Colunas Concebida e Adaptada às Condições Brasileiras", COPPE/UFRJ, 1986.
- [3] CARNEIRO, F.L.L.B., "Some Aspects of the Dimensional Analysis Applied to the Theory and Experimentation of Offshore Platforms", International Symposium on Offshore Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 1981.
- [4] ROITMAN, N., "Modelos Reduzidos Hidroelásticos para Análise do Comportamento Dinâmico de Estruturas para Plataformas Offshore", tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1985.
- [5] RIBEIRO, C.E.P., "Wavemeter for Models", XII Congresso Latino Americano de Hidráulica, DAEE-CTH, São Paulo, Brasil, 1986.
- [6] CHOU, F.S.F., GHOSH, S. e HUANG, E.W., "Conceptual Design Process of Tension Leg Platform", Snare Transactions, vol. 91, pp.275-305, 1983.

[7] DET NORSKE VERITAS, "Strength, Safety and Inspection of Offshore Steel Structures", Rio de Janeiro, 1983.

[8] DILLINGHAM, J.T., "Recent Experience in Model-Scale Simulation of Tension Leg Platform", Marine Technology, vol.21, n.2, pp.186-200,1984.

[9] HUIJSMANS e DEKKER, "Combined Effect of Waves and Current on the Motion Behaviour and Tether Forces of a Deep Water Tension Leg Platform", Offshore Technology Conference, Texas, 1989.

[10] ELLWANGER, G.B., "Alguns Aspectos da Análise e do Projeto de Plataformas Marítimas", tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

[11] Especificação Técnica de Dados Meteo-Oceanográficos, CENPES/SUPEN, Petrobrás, Rio de Janeiro, Brasil.

[12] ROITMAN, N., BATISTA, R.C. e CARNEIRO, F.L.L.B., "Reduced Models for Fixed Offshore Structures", International Symposium on Offshore Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 1983.

[13] BATISTA, R.C., CARNEIRO, F.L.L.B. e ROITMAN, N., "Modelos Reduzidos Hidroelásticos para Análise do Comportamento Dinâmico de Estruturas para Plataformas Offshore-Modelo de Plataforma Fixa", COPPETEC/UFRJ, Rio de

Janeiro, Brasil, 1984.

[14] ROSA, S.R., ROITMAN, N.e BATISTA, R.C., "Water Depth Influence on the Damping Factors of Jack-up Reduced Models in Offshore Engineering", International Symposium on Offshore Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 1987.

[15] BATISTA, R.C., ROITMAN, N., MAGLUTA, C., e CARNEIRO, F.L.L.B., "Damping Factors Estimates for a Jack-up Platform Obtained from a Hydroelastic Reduced Model", International Synposium on Offshore Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 1985.

[16] BATISTA, R.C., CARNEIRO, F.L.L.B. , ROITMAN, N. e MAGLUTA, C., "Modelos Reduzidos Hidroelásticos para Análise do Comportamento Dinâmico de Estruturas para Plataformas Offshore-Modelo de Plataforma Auto-Elevatória AE48", COPPETEC/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1985.

[17] FREIRE, A.C.G., ROITMAN, N. e BATISTA, R.C., "An Experimental Model Study for Deep Water TLP Platform", International Symposium on Offshore Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 1987.

[18] CARVALHO, E.M.L., BATISTA, R.C. e ROITMAN, N., "Experimental Dynamic Analysis of a Compliant Tower Small Scale Model", International Symposium on Offshore Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 1989.

[19] BATISTA, R.C., ROITMAN, N., MAGLUTA, C., LIMA, H.G. e CARNEIRO, P.B., "Mechanical Behaviour of a Lifeboat System During a Simulated Accident", International Symposium on Offshore Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 1989.

[20] ANDRADE, R.F.M., ROITMAN, N., BATISTA, R.C. e ELLWANGER, G., "Dynamic Response Analysis of a TLP Reduced Scale Model", International Symposium on Offshore Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 1989.

[21] MAGLUTA, C., "Análise Dinâmica de Estrutura Flexível em Meio Fluido", tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1985.

[22] MAGLUTA, C., ROITMAN, N., FAIRBAIN, E.M.R., CARVALHO, E.M.L. e BATISTA, R.C., "A Data Acquisition System for Structural Dynamic Analysis: Application on Special Tests", IV International Conference on Computational Methods and Experimental Measurements, Capri, Italy, 1989.